

# Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

Neufestlegung des Faktors  $f_{AV}$  zur Berücksichtigung von Ventilationseinflüssen im vereinfachten Nachweisverfahren nach Anhang A der KTA 2101.2 (12/2000) und Anwendungsbeispiele – Vorhaben 3612R01550

Auftragnehmer:  
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln

B. Forell

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMUB (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

**BfS-RESFOR-117/16**

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:  
**urn:nbn:de:0221-2016120914190**

Salzgitter, Dezember 2016

Neufestlegung des Faktors  $f_{Av}$   
zur Berücksichtigung von  
Ventilationseinflüssen im  
vereinfachten  
Nachweisverfahren nach  
Anhang A der KTA 2101.2  
(12/2000)  
und Anwendungsbeispiele

Burkhard Forell

August 2015

Auftrags-Nr.: 843000

**Anmerkung:**

Dieser Bericht wurde im Rahmen des Vorhabens 3612R01550 mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) erstellt.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer. Die hierin geäußerten Meinungen müssen nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

## Kurzfassung

Im Rahmen der Überarbeitung der Regelreihe KTA 2101 wurde auch das vereinfachte Nachweisverfahren nach Anhang A der KTA 2101.2 überprüft. Dabei wurde ein Änderungsbedarf für den Faktor  $f_{AV}$  im Bild A 3-3 zur Berücksichtigung des Ventilationseinflusses erkannt, der dadurch resultiert, dass in heutiger Zeit höhere Wärmefreisetzungsraten von Raumbränden angesetzt werden, als im Rahmen der Erstellung des Nachweisverfahrens angenommen wurden. Weitere Änderungen an den Bemessungsdiagrammen waren nicht erforderlich.

Der Faktor  $f_{AV}$  wird auf den Grundwert  $t_{ä,0}$  der äquivalenten Branddauer angewendet. Das Öffnungsflächenverhältnis, für den der Grundwert gilt, verschiebt sich wegen einer Korrektur der Gleichung (A 3-4) im Nachweisverfahren von  $A_{V,eff,alt} / A = 1,6 \%$  auf  $A_{V,eff,neu} / A = 2,2 \%$ .

Zur Festlegung des Verlaufs des Faktors  $f_{AV}$  wurden Parameterstudien mit dem Zonenmodell CFAST durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die äquivalente Branddauer insbesondere bei hoher Brandbelastung für  $A_{V,eff,neu} / A > 2,2 \%$  weiter ansteigt, der Grundwert der äquivalenten Branddauer  $t_{ä,0}$  im Nachweisverfahren aber konservativ gewählt wurde. Wenn von dieser Konservativität Kredit genommen wird, ergibt sich bei einem Faktor von  $f_{AV} = 1$  eine Anwendungsgrenze des Verfahrens bei  $A_{V,eff,neu} / A = 3 \%$ .

Ergänzend werden zwei Anwendungsbeispiele vorgestellt.

## Abstract

In the context of the update of the German nuclear fire safety standards (KTA 2101), the simplified fire resistance rating methodology of KTA 2101.2 has been reviewed. The need to replace the existing factor  $f_{AV}$  to account for the ventilation conditions in a given room in Fig-A 3-3 was recognized, because higher heat release rates in compartment fires are expected at the time being in comparison to those at the time of developing the method. Other changes in the design diagrams were not necessary.

The factor  $f_{AV}$  is multiplied with the basic value  $t_{a,0}$  of the equivalent fire duration. The ratio of the effective opening area  $A_{V,eff}$  to the compartment area  $A$ , for which the basic value is valid, changes from  $A_{V,eff,old} / A = 1,6 \%$  to  $A_{V,eff,new} / A = 2,2 \%$ .

For estimating a new  $f_{AV}$  curve, parameter studies have been performed with the zone model CFAST. It has been demonstrated that, in particular for higher fire load densities, the equivalent fire duration further increases for  $A_{V,eff,new} / A > 2,2 \%$ . Also it was shown that the basic value of the equivalent fire duration  $t_{a,0}$  was conservatively chosen in the simplified methodology. Taking credit from the conservative basic value, with a factor of  $f_{AV} = 1$  the simplified fire resistance rating methodology can be applied up to a threshold value of  $A_{V,eff,new} / A = 3 \%$ .

In addition two application examples of the method are given.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Bemessungsbrandszenarien zum Nachweisverfahren gemäß /HOS 96/.....</b>	<b>3</b>
2.1	Geometrie und Ventilation .....	3
2.2	Wärmefreisetzung-Zeit-Verlauf .....	4
2.3	Vergleichsbau teil .....	5
<b>3</b>	<b>Überprüfungsbedarf zum Nachweisverfahren.....</b>	<b>7</b>
3.1	Äquivalenzfaktor zur Umrechnung von natürlicher und maschineller Ventilation.....	7
3.2	Verlauf der Kurve des Faktors $f_{AV}$ des Nachweisverfahrens .....	7
<b>4</b>	<b>Brandsimulationen mit CFAST .....</b>	<b>13</b>
4.1	Vorgehensweise .....	13
4.2	Eingangsdaten für die Simulationen.....	13
4.3	Durchwärmung des Vergleichsbau teils bei ETK-Beanspruchung.....	15
4.4	Bestimmung von $t_{\bar{a}}$ für den Referenzraum mit $A = 150 \text{ m}^2$ .....	17
4.5	Bestimmung von $f_{AV}$ für den Referenzraum mit $A = 150 \text{ m}^2$ .....	19
<b>5</b>	<b>Erläuterungen zur Änderung des Faktors <math>f_{AV}</math> im Anhang A der KTA 2101.2 .....</b>	<b>23</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>25</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>29</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>31</b>
	<b>Anhang 1: Anhang A aus KTA 2101.2, Fassung 2000-12.....</b>	<b>33</b>
	<b>Anhang 2: Anwendungsbeispiele.....</b>	<b>39</b>

## 1 Einführung

Im Rahmen der Überarbeitung der Regelreihe KTA 2101 /KTA 00/ wurde auch das vereinfachte Nachweisverfahren nach Anhang A der KTA 2101.2 überprüft. Die Überprüfung beinhaltete

- die Anwendbarkeit des Regeltexts der KTA 2101.2 hinsichtlich Eindeutigkeit und vollständiger Übernahme der relevanten Aussagen aus dem Forschungsbericht /HOS 96/ und dem ergänzenden Forschungsbericht /HOS 98/,
- die der Bemessung zu Grunde liegenden Eingangsdaten und Brandszenarien hinsichtlich Übereinstimmung mit heutigen Erkenntnissen und Regelwerken und
- die Berücksichtigung realitätsnaher Verhältnisse von Räumen in Kernkraftwerken insbesondere bzgl. der Annahmen zur Ventilation.

Erste Erkenntnisse aus den Überprüfungen des Nachweisverfahrens wurden in /FOR 13/ dokumentiert. Dabei zeigte sich, dass die verwendete Methode des t-Äquivalenz-Verfahrens nach wie vor dem Stand der Technik entspricht. Für die Berücksichtigung der realen Ventilationsverhältnisse durch den Korrekturfaktor  $f_{AV}$  entsprechend des Bildes A 3-3 des Anhangs A (siehe auch Anhang zu diesem Bericht) wurde allerdings ein Bedarf der Neufestlegung des Verlaufs erkannt. Diese Neufestlegung erfordert den Einsatz eines Brandsimulationsmodells, wobei das zur Aufstellung des Nachweisverfahrens verwendete Modell FIGARO (Fire and Gas movements in ROoms) nicht mehr zur Verfügung steht.

In dem hier vorliegenden Bericht werden der Änderungsbedarf zum Nachweisverfahren erläutert und die Simulationsergebnisse zur Neufestlegung des Bildes A 3-3 des Anhangs A der KTA 2101.2 dargestellt. Für die Grundlagen des Verfahrens wird auf den Forschungsbericht /HOS 96/ verwiesen. Die vielen, in /HOS 96/ durchgeführten Parametervariationen sollen und können nicht erneut nachvollzogen werden. Stattdessen werden alle für das Nachweisverfahren gemachten Vereinfachungen (z. B. Wegfall der Flächenabhängigkeit, Beschreibung der Höhenabhängigkeit über Gleichung A 3-2 und Auswirkungen ungleichmäßig verteilter Brandlast) übernommen. Das ist deshalb mög-

lich, weil die genannten Einflüsse im Nachweisverfahren unabhängig voneinander berücksichtigt werden.



## 2 Bemessungsbrandszenarien zum Nachweisverfahren gemäß /HOS 96/

### 2.1 Geometrie und Ventilation

In /HOS 96/ wurden exemplarisch Brandsimulationen für Räume der Fläche  $A_1 = 150 \text{ m}^2$ ,  $A_2 = 250 \text{ m}^2$  und  $A_3 = 450 \text{ m}^2$  bei Raumhöhen von  $H_1 = 2,50 \text{ m}$  und  $H_2 = 5,0 \text{ m}$  durchgeführt (S. 8ff). Die Umfassungsbauteile wurden als Kiesbeton modelliert. Die thermischen Stoffwerte sind in Tab. 2.1 genannt.

**Tab. 2.1:** Thermische Stoffwerte der Umfassungsbauteile (nach /HOS 96/, Tabelle 2.2)

Eigenschaft	$\lambda$ [W/(m*K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J/(kg*K)]
Literaturwert	1,28	2200	879

Die Ventilation wurde als kombinierte Zwangsventilation mit einer zusätzlichen Wandöffnung modelliert. Die Wandöffnungen sollten einerseits Undichtigkeiten und andererseits das nicht vollständige Schließen von Türen im Brandfall berücksichtigen (/HOS 96/, S. 9).

Es wurden konservativ  $A_{v,nat} = 1,3 \text{ m}^2$  Öffnungsfläche pro  $A = 50 \text{ m}^2$  Raumfläche angesetzt, wobei hier eine Anpassung an die Raumhöhe erfolgte:

- $A_{v,nat} = 1,30 \text{ m}^2 = 2,0 \text{ m} \times 0,65 \text{ m}$  pro  $A = 50 \text{ m}^2$  bei 2,5 m Raumhöhe bzw.
- $A_{v,nat} = 1,35 \text{ m}^2 = 3,0 \text{ m} \times 0,45 \text{ m}$  pro  $A = 50 \text{ m}^2$  bei 5,0 m Raumhöhe (siehe /HOS 96/, S. 10).

Die mechanische Ventilation wurde auf Grund von Betreiberangaben festgelegt. Die Betreiberangaben über den mechanischen Luftvolumenstrom pro Fläche ließen sich grob in die beiden Kategorien  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$  bzw.  $2000 \text{ m}^3/\text{h}$  pro  $A = 50 \text{ m}^2$  Raumfläche aufteilen. Angesichts der konservativ hohen Abschätzung für die natürliche Ventilation, wurde für die mechanische Ventilation der geringere Wert von  $\dot{V}_{zu} = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$  pro  $A = 50 \text{ m}^2$  Raumfläche für die Brandmodellierung verwendet (/HOS 96/, S. 10).

Die zitierte Betreiberunterlage zu den Volumenströmen liegt nicht vor. Es ist allerdings davon auszugehen, dass sich die Betreiberangaben auf die betriebliche Lüftung bezogen und der Entrauchungsfall mit einem erhöhten Volumenstrom hier nicht betrachtet wurde.

## **2.2 Wärmefreisetzungs-Zeit-Verlauf**

Die flächenspezifische Brandlastdichte  $q$  [ $\text{MJ}/\text{m}^2$ ] wurde in den Wärmebilanzrechnungen in den folgenden Abstufungen variiert:  $126 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ,  $378 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ,  $720 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ,  $1000 \text{ MJ}/\text{m}^2$  und  $1500 \text{ MJ}/\text{m}^2$  (/HOS 96/, S. 11).

In /HOS 96/ wurden exemplarisch Verläufe von Öllächenbränden und Kabelbränden festgelegt und die Auswirkungen beider Brandverläufe auf die resultierenden Äquivalenten Branddauern untersucht (Kap. 4.2). Dabei zeigte sich, dass die berechneten äquivalenten Branddauern bei PVC-Kabelbränden bis zu 20 % geringer als bei Ölbränden waren, diese Reduzierung aber der Reduzierung durch Verwendung eines effektiven Heizwertes von PVC-Kabeln von  $\chi = 0,8$  entspricht (S. 25f, Bilder 4.2 u. 4.3). Deshalb wurde in Kap. 5.2 festgelegt, Ölbrände als repräsentative Brandlast zu betrachten.

Der modellierte zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzung von Öl- und Kabelbränden wird in /HOS 01/, S. 7 dargestellt. Für Ölbrände steigen die Abbrandrate und die resultierende Wärmefreisetzungsrates linear von Null zum Startzeitpunkt auf ein konstantes Maximum (hier  $17,64 \text{ MW}$ ) nach drei Minuten. Bis zur vollständigen Aufzehrung der Ölbrandlast wird die maximale Abbrandrate bzw. Wärmefreisetzungsrates beibehalten /BLU 14/. Die jeweils modellierten konstanten Maxima der Abbrandraten von Ölbränden sind in /HOS 96/, Bilder 4.5, 4.9, 4.10, 4.11 und 4.12 dokumentiert.

Die für Ölbrände erzielten Aussagen sind für andere Brandlasten als Öl ebenso gültig, solange die Wärmefreisetzung bezogen auf den Sauerstoffbedarf in ähnlicher Größe liegt. Die Wärmefreisetzung bei Verbrennung von organischen Brandlasten beträgt pro eingesetztes Kilogramm Sauerstoff ca.  $13,1 \text{ MJ}$  ( $H_{u,O_2} \approx 13,1 \text{ MJ}/\text{kg}_{O_2}$ , vgl. Bild 3.1 aus /HOS 96/).

### **2.3 Vergleichsbauteil**

Als Vergleichsbauteil diente im Brandsimulationsmodell ein Target mit den thermophysikalischen Eigenschaften einer Stahlbetonplatte von 0,2 m Dicke, deren Temperatur in 0,035 m Tiefe abgegriffen wurde (/HOS 96/, S. 23). Die Durchwärmung des Vergleichsbauteils bei Temperaturbeanspruchung gemäß Einheitstemperaturkurve (ETK) wurde in /HOS 96/ exemplarisch simuliert, wobei der Verlauf einer Referenz (Hosser/Dobbernack/Heins, 1990) gut reproduziert wurde (vgl. /HOS 96/, Bild S. 24). Eine geringfügige Höhenabhängigkeit wurde in /HOS 96/ ebenfalls festgestellt, wobei der kleinere Brandraum ( $H_1 = 2,5$  m) zu höheren Bauteiltemperaturen gegenüber dem höheren Raum ( $H_2 = 5,0$  m) führte.



### 3 Überprüfungsbedarf zum Nachweisverfahren

#### 3.1 Äquivalenzfaktor zur Umrechnung von natürlicher und maschineller Ventilation

Da sich die Ventilation von Raumbränden in Kernkraftwerken aus Beiträgen aus maschineller Ventilation (als Volumenstrom  $\dot{V}_{zu}$  in [m<sup>3</sup>/h]) und natürlicher Ventilation (als vertikale Öffnungsfläche  $A_V$  in [m<sup>2</sup>]) zusammensetzen kann, sieht das Verfahren nach KTA 2101.2 /KTA 00/, Anhang A die Umrechnung von maschinellen Beiträgen als äquivalente Öffnungsfläche vor gemäß (KTA 2101.2, Gl. A 3-4)

$$A_{V,eff} = A_V + \dot{V}_{zu} / 6000$$

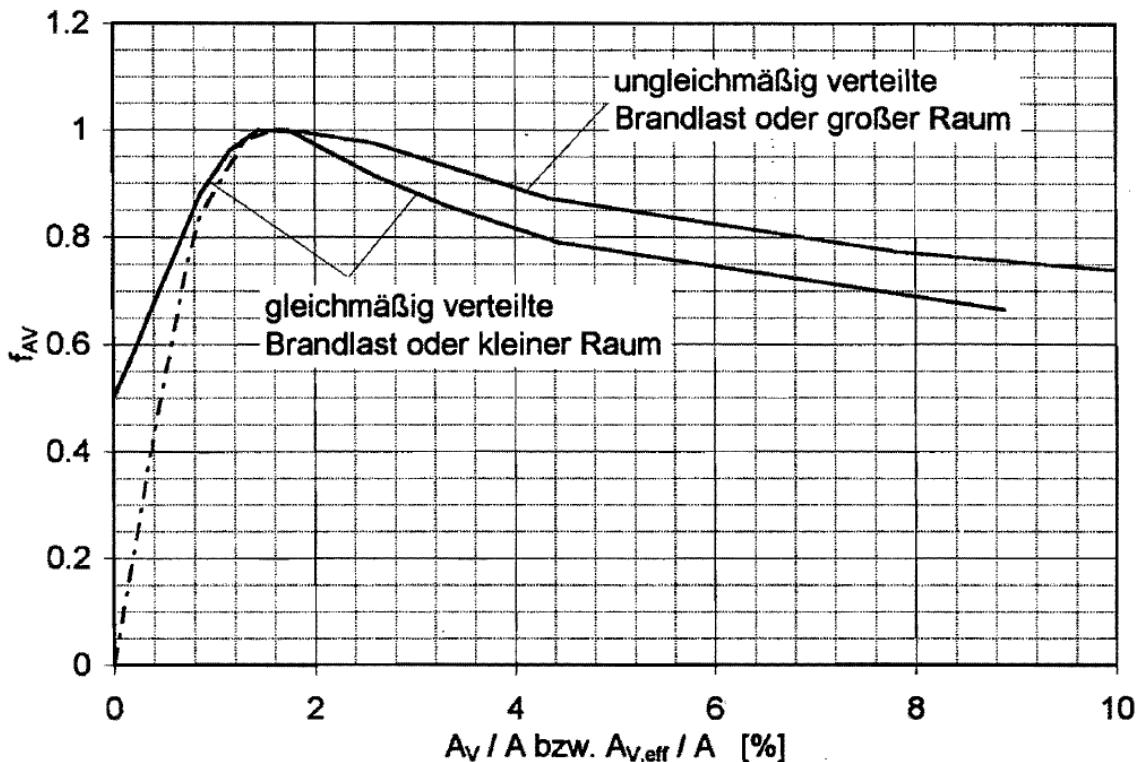
Laut /HOS 96/ (S. 49) berücksichtigt der Korrekturfaktor von 6000 auch, dass der Abluftpfad beispielsweise über eine thermisch ausgelöste Brandschutzklappe abgesperrt wird. Diese planmäßige Reduzierung des Volumenstroms wird allerdings ebenfalls innerhalb des Sicherheitskonzepts des Anhangs A durch die Fallunterscheidung zwischen planmäßigen (p) und unplanmäßigen (u) Ventilationsverhältnissen berücksichtigt. In /FOR 13/ wurde analytisch hergeleitet und mit exemplarischen Brandsimulationen belegt, dass der Äquivalenzfaktor von 6000 auf 2200 angepasst werden sollte. Die Gleichung A 3-4 der KTA 2101.2 (2000-12) wurde entsprechend geändert.

Als mechanische Zuluft im unplanmäßigen Fall kann auch der Beitrag aus dem brandbedingten Versagen von Pressluftsystemen zählen.

#### 3.2 Verlauf der Kurve des Faktors $f_{AV}$ des Nachweisverfahrens

Der Korrekturfaktor  $f_{AV}$  für die tatsächliche Ventilation des Brandraums ist in Abb. 3.1 dargestellt. Für das Öffnungsflächenverhältnis  $A_{V,eff}/A < 1,6\%$  stellt die Abbildung den aus den Brandsimulationen resultierenden Verlauf gestrichelt dar, der für dichte Räume zu  $f_{AV} = 0$  führt. Der Wert wurde per Konvention auf  $f_{AV} = 0,5$  angehoben, um Undichtigkeiten in den Brandräumen zu berücksichtigen. Hervorzuheben ist, dass die maximale Feuerwiderstandsdauer ( $f_{AV} = 1$ ) bei  $A_{V,eff}/A = 1,6\%$  erforderlich wird, während in

der methodisch verwandten DIN 18230-1 /DIN 10/ der Faktor  $w_0$  bis 3 % sein Maximum behält (Hinweis: in der DIN 18230-1 wurde der Faktor  $w_0$  für kleine Zuluftverhältnisse ähnlich der Vorgehensweise in Abb. 3.1 hochgesetzt, allerdings auf das volle Niveau von „1“). Aus  $A_{v,eff}/A = 1,6$  % ergibt sich, dass für den Referenzraum (vgl. Abschnitt 2.1) der Fläche  $A = 150 \text{ m}^2$  mit der Referenzventilation von  $\dot{V}_{zu} = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$  pro  $A = 50 \text{ m}^2$  Raumfläche bei einer Öffnungsfläche für natürliche Ventilation von  $A_v = 1,9 \text{ m}^2$  die maximale Feuerwiderstandsdauer berechnet wird.



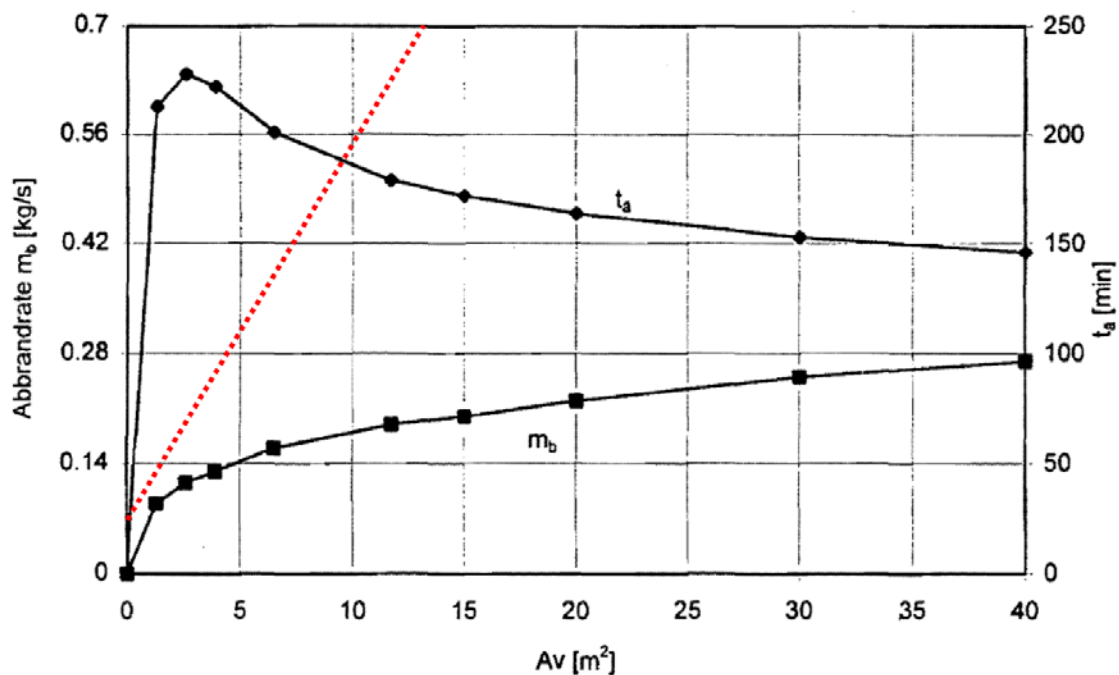
**Abb. 3.1:** Korrekturfaktor  $f_{AV}$  mit dem aus den Brandsimulationen resultierenden Verlauf (gestrichelt) und dem in der KTA 2101.2 übernommenen Verlauf (durchgezogen) (Bild 6.3 aus /HOS 96/)

Die Abb. 3.1 bzw. das Bild A 3-3 des Anhangs A der KTA-Regel 2101.2 (2000-12) wurde aus den Abb. 3.2 bis Abb. 3.4 (Bilder 4.5, 4.9 und 4.10 aus /HOS 96/) entwickelt (/HOS 96/, S. 46). In den drei grafisch ausgewerteten Parameterstudien wurden Brandsimulationen systematisch bzgl. der vorgegebenen Abbrandrate von Öl und der resultierenden äquivalenten Branddauer variiert. Folgende Eingangswerte wurden verwendet:

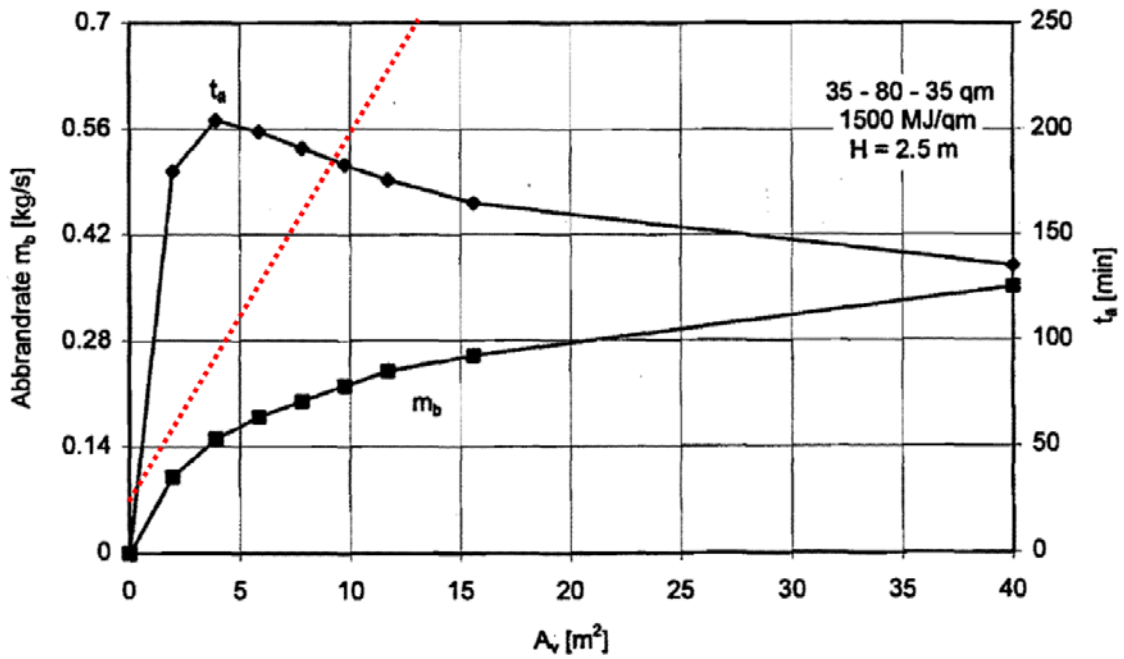
Allen Simulationen gemeinsame Randbedingungen:

- Raumfläche  $A = 150 \text{ m}^2$ ,
- mechanische Ventilation von  $\dot{V}_{zu} = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$  pro  $A = 50 \text{ m}^2$  Raumfläche, entsprechend  $0,833 \text{ m}^3/\text{s}$  bzw.  $1,01 \text{ kg/s}$  mechanische Luftzufuhr für den Gesamtraum (daraus resultiert nach alter Berechnung:  $A_{V,\text{eff,alt}} = A_V + 0,50 \text{ m}^2$  sowie nach korrigierter Berechnung:  $A_{V,\text{eff,neu}} = A_V + 1,36 \text{ m}^2$ ),
- vertikale Öffnungsfläche  $A_V$  variiert von 0 bis  $40 \text{ m}^2$  ( $A_V / A = 0 \%$  bis  $26,7 \%$ ),  $A_{V,\text{eff,alt}} / A = 0,33 \%$  bis  $27,0 \%$  bzw.  $A_{V,\text{eff,neu}} / A = 0,91 \%$  bis  $27,6 \%$ ,
- Abbrand von Öl mit stöchiometrischem Luftbedarf von  $15,2 \text{ kg}_L/\text{kg}_{\text{Öl}}$ , effektivem Heizwert von  $42 \text{ MJ/kg}$  (/HOS 96/, S. 14),

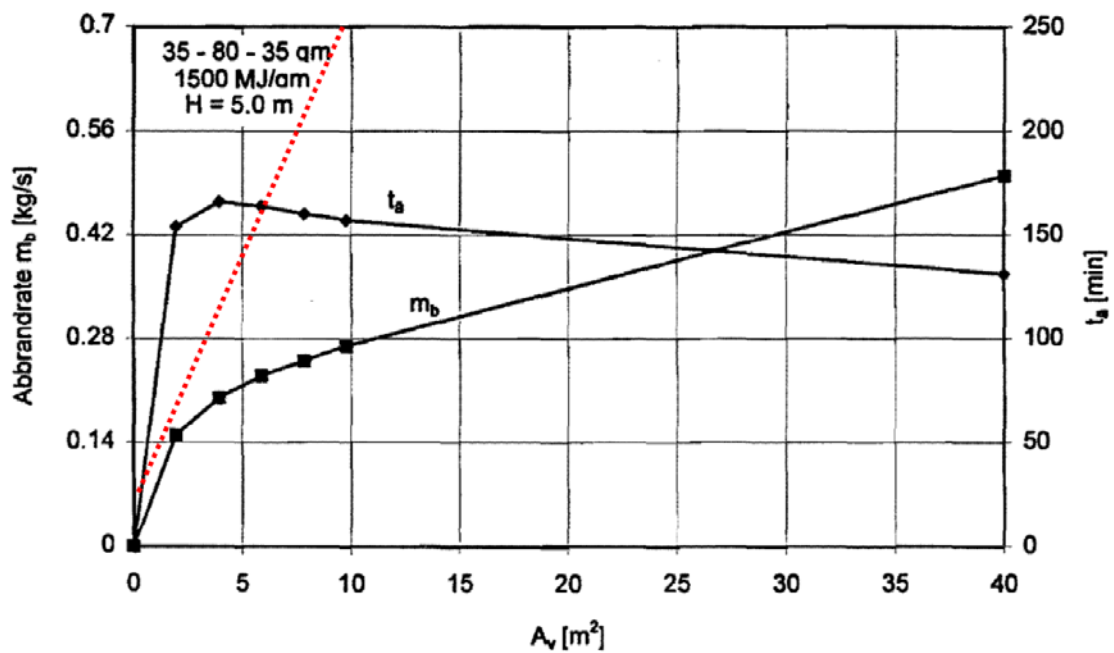
Die drei Parameterstudien unterscheiden sich in der Raumhöhe ( $H = 2,5 \text{ m}$  bzw.  $5,0 \text{ m}$ ) mit der damit verbundenen Höhe  $h_V$  der Ventilationsfläche und der Brandfläche.



**Abb. 3.2:** Abbrandrate (untere Kurve) und äquivalente Branddauer (obere Kurve) bei Ölbränden in einem Raum mit  $2,5 \text{ m}$  Höhe bei variiertem Ventilationsöffnung  $A_V$  (Bild 4.5 aus /HOS 96/)



**Abb. 3.3:** Abbrandrate (untere Kurve) und äquivalente Branddauer (obere Kurve) bei großflächigen Ölbränden in einem Raum mit 2,5 m Höhe bei variierter Ventilationsöffnung  $A_v$  (Bild 4.9 aus /HOS 96/)



**Abb. 3.4:** Abbrandrate (untere Kurve) und äquivalente Branddauer (obere Kurve) bei großflächigen Ölbränden in einem Raum mit 5,0 m Höhe bei variierter Ventilationsöffnung  $A_v$  (Bild 4.10 aus /HOS 96/)



Wie in den Abbildungen zu sehen ist, wurde die Abbrandrate nicht linear mit der natürlichen Ventilationsfläche  $A_V$  erhöht. Dadurch sind Brände mit großen Ventilationsflächen besser ventilert als Brände mit kleinen Ventilationsflächen. Hierdurch resultiert die Abnahme von  $t_{\text{ä}}$ . Die bei den Parameterstudien vorgelegene Ventilation soll anhand des Äquivalenzverhältnis (englisch: Equivalence Ratio, ER) verdeutlicht werden. Das Äquivalenzverhältnis ist das Verhältnis aus Luftbedarf im Brandraum zur Luftversorgung des Brandraums. Ein Äquivalenzverhältnisses von  $ER = 1$  zeigt einen stöchiometrisch ventilerten Brandraum an. Ein  $ER < 1$  bedeutet Luftüberschuss („überventiliert“), ein  $ER > 1$  bedeutet Luftmangel („unterventiliert“). Der Luftbedarf ergibt sich aus der Abbrandrate multipliziert mit dem stöchiometrischen Luftbedarf ( $SLB = 15,2 \text{ kg}_L/\text{kg}_{\text{öi}}$ , /HOS 96/). Die Luftversorgung ergibt sich aus der mechanischen Zwangsventilation (hier  $1,01 \text{ kg/s}$  mechanische Luftzufuhr) und der Luftzufuhr durch vertikale Öffnungen im Vollbrand, die sich aus der KAWAGOE-Gleichung /DRY 98/ bestimmen lässt:

$$\dot{m}_{Luft} = 0,52 * A_V * h_v^{0,5}$$

Für die drei Parameterstudien wurde die Abbrandrate bestimmt, bei der ein stöchiometrisch ventilierter Brand vorgelegen hätte. Dafür wurden folgende Referenzpunkte berechnet:

- Abbrandrate (MLR), die ohne natürliche Zuluftöffnung ( $A_V = 0$ ) erreicht würde:  
 $MLR(A_V = 0) = 1,01 \text{ kg}_L/\text{s} / 15,2 \text{ kg}_L/\text{kg}_{\text{öi}} \Rightarrow 0,066 \text{ kg}_{\text{öi}}/\text{s};$
- Natürliche Zuluftöffnung ( $A_V$ ), die bei maximal im Diagramm dargestellter Abbrandrate von  $MLR = 0,7 \text{ kg/s}$  notwendig würde:  
 $A_V(MLR = 0,7 \text{ kg}_{\text{öi}}/\text{s}) = (0,7 * 15,2 - 1,01) / (0,52 * h_v^{0,5})$   
 $\Rightarrow A_V = 13,1 \text{ m}^2$  (bei  $h_v = 2,0 \text{ m}$ ) bzw.  $9,9 \text{ m}^2$  (bei  $h_v = 3,5 \text{ m}$ ).

Diese Geraden sind in den Abb. 3.2 bis Abb. 3.4 als rot gestrichelte Linien nachgetragen worden. Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass die höchsten äquivalenten Branddauern bei relativ hohen Äquivalenzverhältnissen erreicht wurden. Die auf die Raumfläche bezogenen Wärmefreisetzungen, die für die jeweils höchsten äquivalenten Branddauern vorgelegen haben, werden in Tab. 3.1 dargestellt.

Die flächenbezogenen Wärmefreisetzungsraten, bei denen die höchsten äquivalenten Branddauern erreicht wurden, sind mit 32 bis 55 kW/m<sup>2</sup> relativ gering. Dies führt zu relativ geringen Raumtemperaturen im Vollbrand bei relativ langen Branddauern.

**Tab. 3.1:** Auswertung der drei Parameterstudien bzgl. vertikaler Öffnungsgröße bei maximaler äquivalenter Branddauer ( $A_v(t_{\ddot{a}} = \max)$ ), Abbrandrate bei maximaler äquivalenter Branddauer (MLR ( $t_{\ddot{a}} = \max$ )) und Wärmefreisetzung pro Grundfläche bei maximaler äquivalenter Branddauer (HRR / A)

Abbildung (Bild in /HOS 96/)	$A_v(t_{\ddot{a}} = \max)$ [m <sup>2</sup> ]	MLR ( $t_{\ddot{a}} = \max$ ) [kg/s]	HRR / A [kW/m <sup>2</sup> ]
Abb. 3.2 (Bild 4.5)	2,50	0,114	31,9
Abb. 3.3 (Bild 4.9)	3,77	0,149	41,9
Abb. 3.4 (Bild 4.10)	3,87	0,196	54,9

Die heutige Referenz für flächenbezogene Abbrandraten und resultierende Wärmefreisetzungsraten im baurechtlichen Verfahren stellt der nationale Anhang zum Eurocode 1 /DIN 10a/ dar. Dort wird für den brennstoffgesteuerten Brand eine Wärmefreisetzungsrate von 250 kW/m<sup>2</sup> bezogen auf die Gesamtfläche des Brandraums verwendet (vgl. Gl. AA.2 in /DIN 10a/).

Eine höhere flächenbezogene Abbrandrate führt an Stelle des derzeit abfallenden Verlaufs in von  $f_{A_v}$  ab  $A_{v,eff}/A > 1,6 \%$  (vgl. Abb. 3.1) zu einem höheren Wert. Der genaue Verlauf soll mithilfe von Brandsimulationen untersucht werden.

## **4 Brandsimulationen mit CFAST**

### **4.1 Vorgehensweise**

Die Simulationen wurden mit dem Zonenmodell CFAST in der Version 6.3 (r1445) /PEA 13/, /PEA 13a/ durchgeführt. Da nur der Verlauf des dimensionslosen Faktors  $f_{AV}$  der Abb. 3.1 überprüft werden soll, soll mit den neuen Simulation auf die zugrunde liegenden und in /HOS 96/ dokumentierten Simulationen aufgesetzt werden. Da in dieser Studie mit CFAST ein anderes Brandsimulationsmodell eingesetzt wird als ursprünglich in /HOS 96/ verwendet, sind Abweichungen innerhalb bestimmter Grenzen nicht auszuschließen.

Die Simulationen lassen sich in drei Abschnitte einteilen, die jeweils mit den in /HOS 96/ dokumentierten Ergebnissen verglichen werden:

1. Im ersten Schritt wurde die Erwärmung des Vergleichsbauteils bei Einheitstemperatur-Zeitkurve durchgeführt (Abschnitt 4.3).
2. Im zweiten Schritt wurden die in einem Referenzraum unter den alten Wärmefreisetzungsverläufen erzielten äquivalenten Branddauern berechnet (Abschnitt 4.4).
3. Im dritten Schritt wurden die neuen Wärmefreisetzungsverläufe verwendet und die äquivalenten Branddauern sowie die Faktoren  $f_{AV}$  berechnet (Abschnitt 4.5).

### **4.2 Eingangsdaten für die Simulationen**

Die Beispierräume wurden in Übereinstimmung mit den Beispielen aus /HOS 96/ festgelegt. Soweit nicht alle Details dokumentiert sind, wird von Standardbedingungen bzw. üblichen Bedingungen ausgegangen. Folgende Einstellungen wurden in CFAST vorgenommen:

#### Simulation Environment (Umgebungsbedingungen):

- Außen- und Starttemperatur: 20°C, Luftdruck: 1013 hPa, 50 % rel. Luftfeuchtigkeit (Standard)

### Compartment Geometry (Raumgeometrie):

- Ein Brandraum,  $A = 150 \text{ m}^2$  (10 m x 15 m),  $H = 2,5 \text{ m}$  (vgl. Abschnitt 2.1),
- Zwei-Zonen-Modell (Standard),
- Umfassungsbauteile in Beton, Dicke 0,4 m (d.h. „thermisch dick“, s. u.),
- thermische Stoffwerte  $\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_p = 879 = \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,  $\lambda = 1,28 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  (nach /HOS 96/, vgl. Tab. 2.1), Emissivität  $\varepsilon = 0,9$  (in /HOS 96/ nicht dokumentiert, vgl. deshalb Eigenschaften des Vergleichsbauteils im Normungsvorhaben DIN 18230-4 /NAB 10/).

### Wall Vents (Natürliche Zuluftöffnungen in den Wänden)

- Eine natürliche Zuluftöffnung,  $h_v = 2 \text{ m}$ ,  $w_v$  variabel (bei ETK-Simulation  $w_v = 5 \text{ m}$ ), ständig geöffnet, freie Abströmung (vgl. Abschnitt 2.1)

### Ceiling/Floor Vents (Natürliche Zuluftöffnungen in den Decken und Böden)

- keine

### Mechanical Flow Vents (Mechanische Zuluftöffnungen)

- Zuluftöffnung: Volumenstrom  $0,833 \text{ m}^3/\text{s}$  (konstant, druckunabhängig),  $1 \text{ m}^2$  Öffnungsgröße, mittlere Auslasshöhe 1 m,
- Abluftöffnung: Volumenstrom  $0,833 \text{ m}^3/\text{s}$  (konstant, druckunabhängig),  $1 \text{ m}^2$  Öffnungsgröße, mittlere Ansaughöhe 2 m (vgl. Abschnitt 2.1).

### Fires (hier: Bemessungsbrand)

- Position: in Raummitte, Plume-Modell: McCaffrey (Standard),
- Ceiling-Jet: Decke und Wände (Standard),
- Lower Oxygen Limit: 0 % (konservativ, wirkt sich bei kleinen  $A_v$  auf die Maximaltemperaturen aus),
- Brandgut (Öl als  $\text{C}_1\text{H}_2$ , Heizwert =  $42 \text{ MJ/kg}$  /HOS 96/, Rußausbeute:  $0,07 \text{ g/g}$ , CO-Ausbeute:  $0,02 \text{ g/g}$ , Strahlungsanteil des Feuers:  $0,3$  (Standard)),

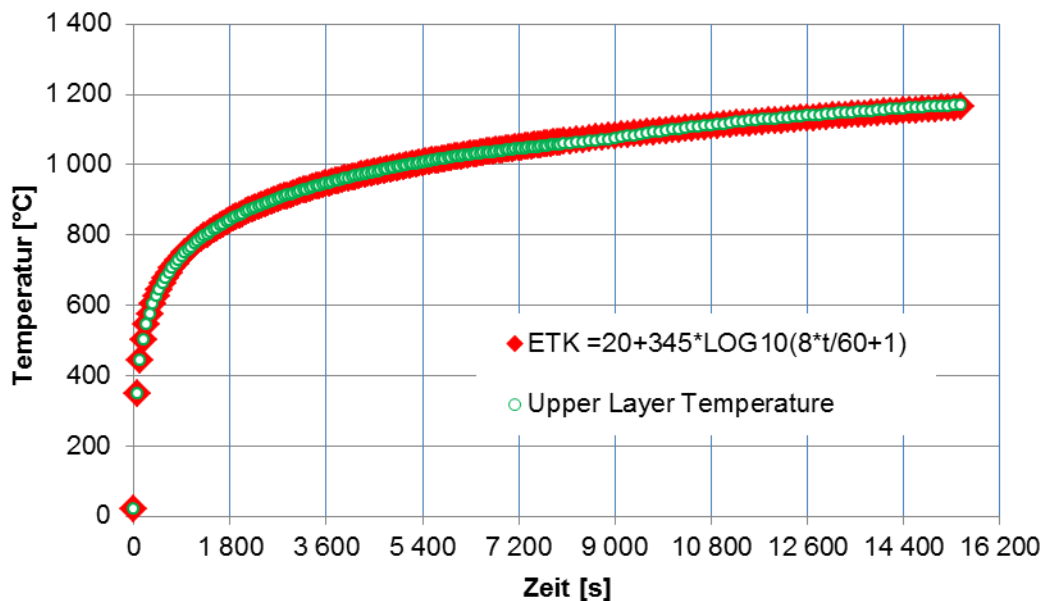
- Brandfläche: 40 m<sup>2</sup> (vgl. /HOS 96/),
- Zeitverlauf der Wärmefreisetzungsrates (HRR): variabel, s. u.

#### Targets (hier: Vergleichsbaueteil)

- Da CFAST standardmäßig nur die Temperatur in der Mitte eines Targets ausgibt, wird die tatsächliche Dicke des Vergleichsbaueteils von 0,2 m an die Referenztiefe (0,035 m) angepasst, sodass die modellierte Dicke 0,07 m beträgt. Das Bauteil wird als thermisch dick modelliert, sodass das eindimensionale Wärmeleitungsmodell mit einer halbunendlichen Ausdehnung rechnet. Da die thermische Durchdringungszeit („thermal penetration time“) von Beton der Dicke 0,2 m  $t_{pen} = 252$  min beträgt, führen die Annahmen für die relevanten Branddauern zu vernachlässigbaren Fehlern (vgl. /NRC 07/).
- Thermophysikalische Eigenschaften entsprechend Tab. 2.1 /HOS 96/,  $\epsilon = 0,9$  /NAB 10/,
- Position: unterhalb der Decke, dem Feuer abgewandt,
- Lösungsmethode des eindimensionalen Wärmeleitungsmodells: Implizit (Standard).

### **4.3 Durchwärmung des Vergleichsbaueteils bei ETK-Beanspruchung**

Analog der Vorgehensweise in /HOS 96/ wird zunächst die Erwärmung des Vergleichsbaueteils bei Beanspruchung nach Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) bestimmt. Dabei wurde die Wärmefreisetzungsrates iterativ so festgelegt, bis der Temperatur-Zeitverlauf in der Heißgasschicht dem Verlauf der ETK entsprach (siehe Abb. 4.1). Die Abweichungen zwischen ETK-Verlauf und Temperaturverlauf der Brandsimulation waren zu jedem Zeitpunkt kleiner als 1 %.

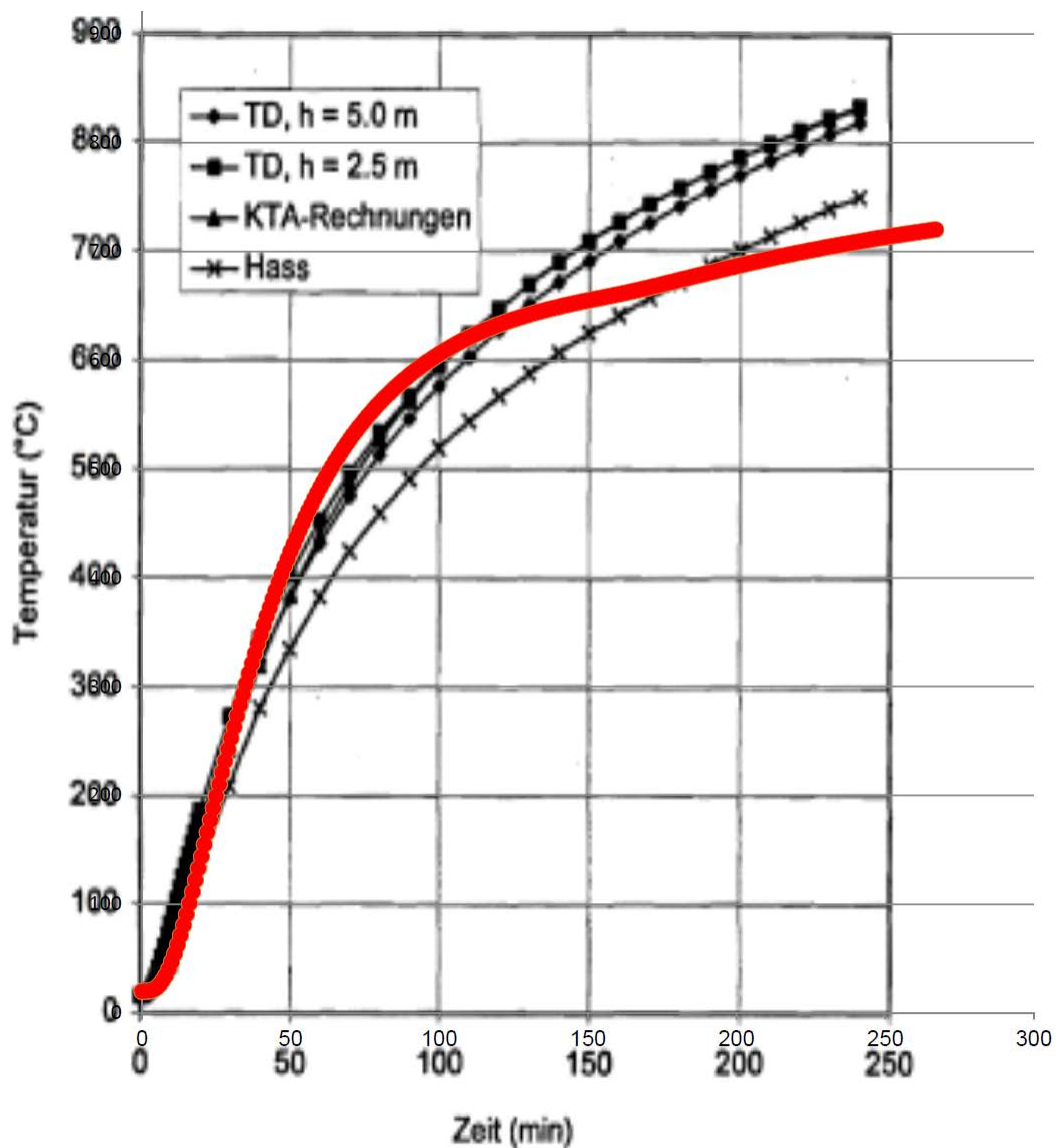


**Abb. 4.1:** Verlauf der ETK und des im Referenzraum simulierten Temperaturverlaufs (3600 s = 1 h)

Mit dem ETK-Verlauf wurde die Durchwärmung des Vergleichsbauteils ausgewertet. Abb. 4.2 (aus Bild 4.1 /HOS 96/) stellt den Vergleich der in /HOS 96/ dargestellten Ergebnisse mit den Ergebnissen von CFAST (rot) dar. In /HOS 96/ wurden Simulationen „TD“ für Räume der Höhe  $H = 5,0$  m und  $H = 2,5$  m durchgeführt und mit weiteren Simulationen „KTA“ sowie mit einem damals bereits bestehenden Parametersatz nach „R. Hass“ verglichen. Die Simulationsergebnisse lagen dicht beieinander, wobei eine leichte Höhenabhängigkeit festgestellt wurde. Die Erwärmung nach „Hass“ liegt unterhalb der Simulationsergebnisse.

Mit den verwendeten thermophysikalischen Daten lässt sich der Erwärmungsverlauf mit CFAST insbesondere in den relevanten Zeitdauern bis zur 120. Brandminute sehr gut reproduzieren. Insofern ist die Vorgehensweise unter Verwendung von CFAST geeignet, durch Vergleich mit dem Erwärmungsverlauf bei Naturbränden die Zeiten  $t_a$  zu bestimmen. Für sehr lange Branddauern ist die Erwärmung in 0,035 m Tiefe im Vergleich zu /HOS 96/ geringer. Diese Abweichung erklärt sich durch die Modellierung des Vergleichsbauteils in CFAST als „thermisch dickes“ Bauteil mit halbbunendlicher Ausdehnung, bei der die Wärmeabfuhr in das Bauteilinnere im Vergleich zum 0,2 m dicken Vergleichsbauteil überschätzt wird. Da der Vergleich zur Bestimmung von  $t_a$  mit dem neu festgelegten Verlauf geführt wird (d. h. innerhalb eines Modells und Parametersat-

zes), werden die Auswirkungen von Abweichungen weiter minimiert, wie auch in den Arbeiten /SCH 90/, /UPM 01/ gezeigt wurde.



**Abb. 4.2:** Vergleich der Erwärmung des Vergleichsbauteils nach /HOS 96/ (dort Bild 4.1) mit den Ergebnissen der CFAST-Simulation (rote, überlagerte Linie)

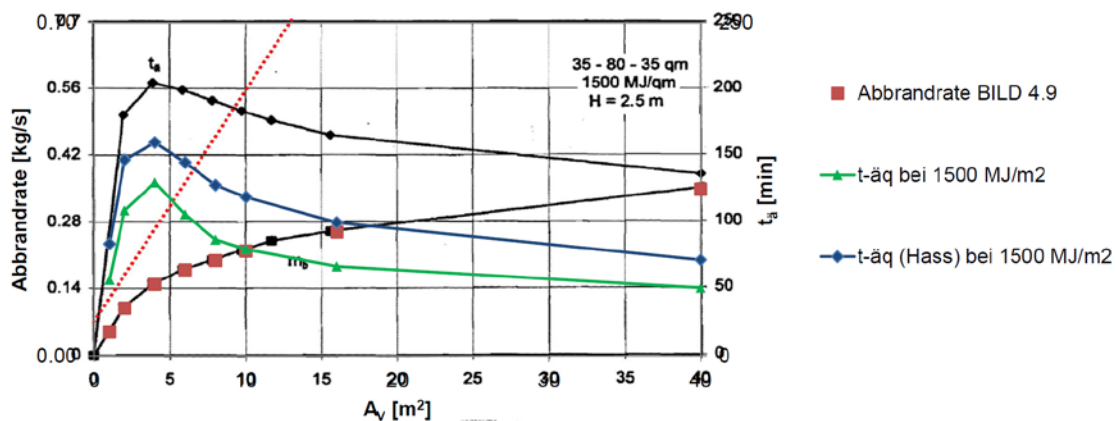
#### 4.4 Bestimmung von $t_a$ für den Referenzraum mit $A = 150 \text{ m}^2$

Als weiterer Teil der Vergleichsstudien wird die in /HOS 96/ dokumentierte äquivalente Branddauer für einen Referenzraum ( $A = 150 \text{ m}^2$ ,  $H = 2,5 \text{ m}$ ,  $q = 1500 \text{ MJ/m}^2$ ) berechnet und verglichen. Analog des in /HOS 01/ dargestellten Verlaufs der Abbrandrate

wird von einer kurzen Anstiegsphase von 180 s ausgegangen, wonach dann eine konstante Abbrandrate bis zur vollständigen Aufzehrung der Brandlasten verwendet wird.

Als Vergleich werden die Ergebnisse des Bildes 4.9 nach /HOS 96/ herangezogen, die in Abb. 4.3 wiedergegeben sind. Die neuen Simulationsergebnisse sind darübergerlegt. Die konstanten Abbrandraten (rote Vierecke) wurden für die jeweiligen Öffnungsflächen  $A_V$  ausgelesen und reproduziert.

Als Ergebnis der neuen Simulationen wurden äquivalente Branddauern,  $t_{\text{äq}}$  (grüne, dreieckige Symbole in Abb. 4.3) bestimmt. Im Vergleich zu den äquivalenten Branddauern nach /HOS 96/  $t_a$ , (schwarze Rauten) sind die mit CFAST bestimmten äquivalenten Branddauern deutlich geringer, der qualitative Verlauf wird aber wiedergegeben. Die Abweichung ist vor allem darin begründet, dass in /HOS 96/ für die Brandsimulationen mit ETK-Verlauf und für die Naturbrandsimulationen unterschiedliche Parametersätze für das Vergleichsbauteil verwendet wurden. Die genauen Parametersätze liegen nicht mehr vor, allerdings wird vermutet, dass der zweite Parametersatz durch den Erwärmungsverlauf nach R. Hass (vgl. Abb. 4.2) gegeben ist /BLU 14/. Deshalb wurde eine zweite Äquivalenztemperatur,  $t_{\text{äq}}$  (Hass) (blaue Rauten in Abb. 4.3), durch Vergleich mit dem Erwärmungsverlauf nach R. Hass ermittelt.



**Abb. 4.3:** Vergleich der ermittelten äquivalenten Branddauern nach /HOS 96/ (dort Bild 4.9, schwarz) mit den Ergebnissen der CFAST-Simulation  $t_{\text{äq}}$  (grüne Linie) und  $t_{\text{äq}}$ (Hass) (blaue Linie)

Die mit CFAST und Vergleich mit dem Erwärmungsverlauf nach R. Hass bestimmten Branddauern liegen für kleine Öffnungsflächen ( $A_V < 5 \text{ m}^2$ ) relativ dicht am  $t_a$  nach /HOS 96/. Für große  $A_V$  werden die Abweichungen zwischen  $t_{\text{äq}}$  (Hass) und  $t_a$



/HOS 96/ aber größer. Die Abweichungen lassen sich unter anderem durch die Abweichungen im Erwärmungsverlauf des Vergleichsbauteils mit CFAST bzw. entsprechend der Kurven „TD“ in Abb. 4.2 erklären. Bei den großen Ventilationsöffnungen  $A_V$  kommen die verwendeten Plume-Modelle als weiterer Einflussfaktor hinzu: Wie bereits in Abschnitt 3.2 dargelegt, wurden für die großen  $A_V$  mit den gegebenen Abbrandraten keine Vollbrände simuliert, sondern Brände, bei denen eine signifikante raucharme Schichthöhe im Brandraum eingehalten wurde, deren jeweilige Höhe von der Wahl des eingesetzten Plume-Modells abhängt. Da der berechnete Massenstrom der verschiedenen, in den Zonenmodellen eingesetzten Plume-Modellen durchaus stark abweichen kann, unterscheiden sich die Heißgastemperaturen unter diesen Bedingungen deutlicher als unter Vollbrandbedingungen, bei denen immer die maximal zur Verfügung stehende Luftmenge eingemischt wird.

Auf Grund der verschiedenen, teilweise nicht mehr quantifizierbaren Einflüsse ist ein genaues Reproduzieren der damaligen Ergebnisse für  $t_a$  im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr möglich. Es konnte aber gezeigt werden, dass durch die Verwendung von zwei Parametersätzen eine gewisse Konservativität in das Nachweisverfahren eingebracht wurde.

Der Verlauf der damaligen Ergebnisse wird qualitativ gut nachvollzogen. Deshalb ist es mit CFAST ebenfalls möglich, den Verlauf des dimensionslosen Faktors  $f_{AV}$  der Abb. 3.1 zu überprüfen. Dabei wird wieder die mittels CFAST bestimmte Kurve der Abb. 4.2 zur Bestimmung von  $t_a$  verwendet, um den Einfluss unterschiedlicher Parametersätze auszuschalten. Eine zweimalige Verwendung von unterschiedlichen Parametersätzen für ETK- bzw. Naturbrandbeanspruchung würde nochmals Konservativität in das Nachweisverfahren einbringen.

#### **4.5 Bestimmung von $f_{AV}$ für den Referenzraum mit $A = 150 \text{ m}^2$**

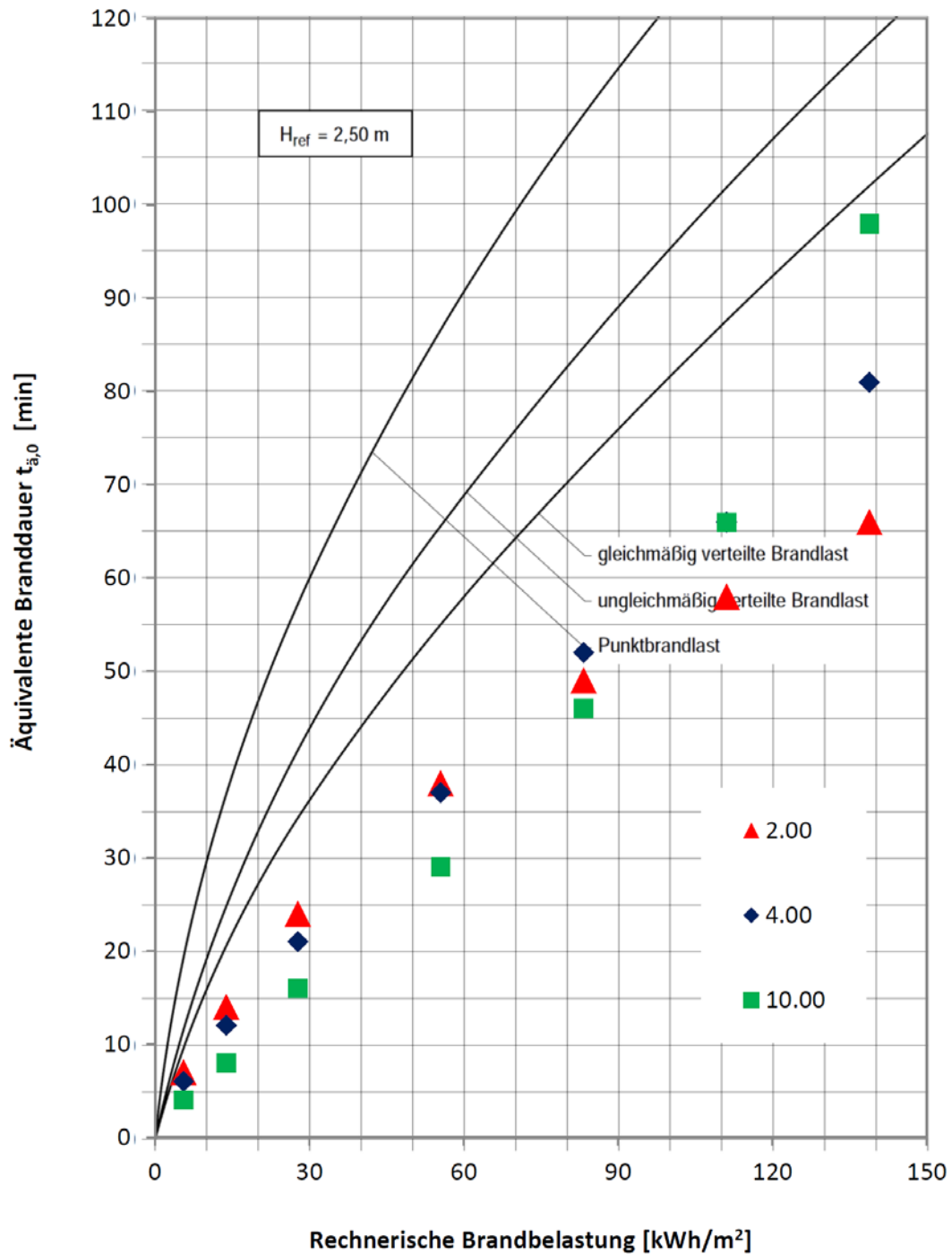
Während bisher die Ergebnisse nach /HOS 96/ nachvollzogen wurden, erfolgt die Bestimmung des Verlaufs von  $f_{AV}$  unter Variation der eingesetzten Abbrand- bzw. Wärmefreisetzungsraten. Entsprechend des nationalen Anhangs zum Eurocode 1 /DIN 10a/ wird von einer maximalen Wärmefreisetzungsrate von i.d.R.  $250 \text{ kW/m}^2$  bezogen auf die Gesamtfläche des Brandraums ausgegangen (hier:  $A = 150 \text{ m}^2 \Rightarrow \text{HRR}_{\text{max,Fläche}} = 37,5 \text{ MW}$ ). Die Wärmefreisetzungsrate ist aber ebenfalls durch die Ventilation begrenzt, die sich hier aus der mechanischen Zuluft von  $1,01 \text{ kg/s}$  und dem Beitrag der natürli-

chen Öffnung der variablen Fläche  $A_V$  bei der Größe  $h_V = 2,0$  m zusammensetzt. Für die maximale Wärmefreisetzungsrate wird davon ausgegangen, dass ein Anteil von 0,73 des in den Brandraum gelangenden Sauerstoffs für die Verbrennung genutzt wird und 13,1 MJ/kg<sub>O<sub>2</sub></sub> Brandwärme freigesetzt werden. Der Anteil 0,73 ist etwas kleiner als der Vergleichswert von 0,77, der sich mit der Gleichung AA.1 der /DIN 10a/ bestimmen lässt. Der geringere Ausnutzungsgrad ist aber vertretbar. Im Vergleich zur in /HOS 96/ verwendeten Abbrandrate beträgt die nun verwendete Abbrandrate 73 % der in Abb. 3.2 bzw. Abb. 4.3 eingezeichneten rot gestrichelten Linie für den stöchiometrischen Brand. Dadurch beträgt für den  $A = 150$  m<sup>2</sup> großen Brandraum mit z. B.  $A_V = 6$  m<sup>2</sup> und mechanischer Ventilation ( $A_{V,eff,neu} / A = 4,9$  %) die Wärmefreisetzungsrate 11,99 MW bzw. 80 kW/m<sup>2</sup>. Durch die erhöhten Abbrand-/Wärmefreisetzungsraten werden Vollbrände simuliert, bei denen der zuvor beschriebene Einfluss des verwendeten Plume-Modells eine untergeordnete Rolle spielt.

Mit den erhöhten Abbrand- bzw. Wärmefreisetzungsraten wurden für den Brandraum äquivalente Branddauern in Abhängigkeit der eingesetzten Brandlasten berechnet und mit dem Bemessungsdiagramm nach KTA 2101.2 /KTA 00/ verglichen (siehe Abb. 4.4).

Innerhalb der Abbildung ist die äquivalente Branddauer  $t_{a,0}$  für „gleichmäßig verteilte Brandlast“, d. h. die untere Kurve, mit den Ergebnissen bei  $A_V = 2$  m<sup>2</sup> natürlicher Ventilationsfläche (rote Dreiecke) zu vergleichen, da der Wert von  $A_V \approx 2$  m<sup>2</sup> dem bisherigen Optimum ( $A_{V,eff,alt} / A = 1,6$  %) entspricht. Es zeigt sich, dass für den betrachteten Brandbelastungsbereich die Bemessung nach KTA gegenüber den neuen Ergebnissen immer noch konservativ ist, obwohl durch die gegenüber /HOS 96/ erhöhte Abbrandrate die Brandlast optimaler ausgenutzt wird.

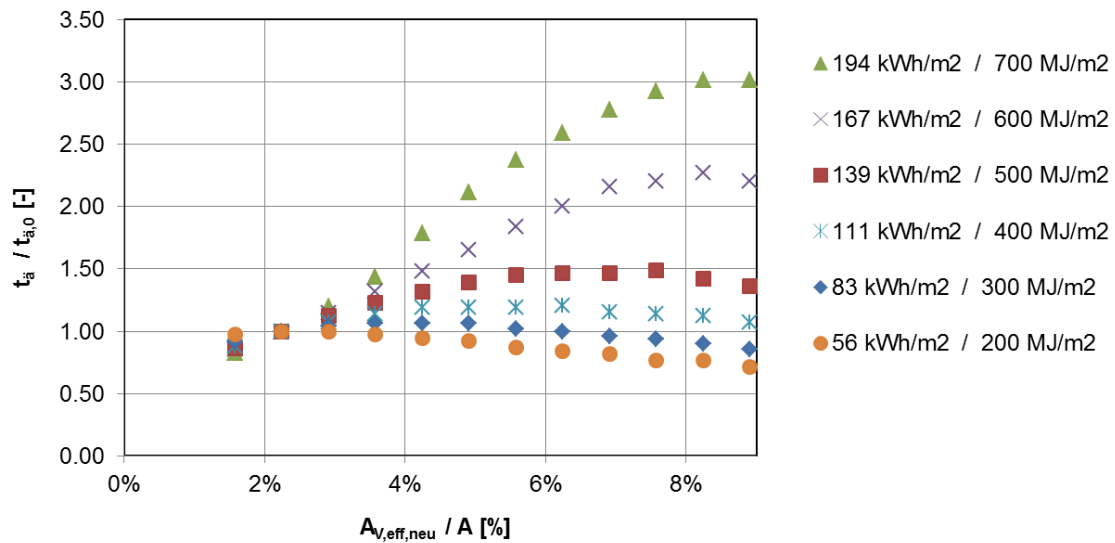
Zum Vergleich wurde in Abb. 4.4 ebenfalls die äquivalente Branddauer bei  $A_V = 4$  m<sup>2</sup> ( $A_{V,eff,alt} / A = 3,0$  %, blaue Rauten) und  $A_V = 10$  m<sup>2</sup> ( $A_{V,eff,alt} / A = 7,6$  %, grüne Quadrate) eingetragen. Bei den größeren Öffnungsflächen wurde jeweils die Abbrand-/Wärmefreisetzungsrate erhöht. In der Folge erhöht sich für größere Brandbelastungen die äquivalente Branddauer gegenüber dem Grundwert  $t_{a,0}$  bei  $A_V = 2$  m<sup>2</sup>. Bei kleinen Brandbelastungen dreht sich der Effekt sogar geringfügig um.



**Abb. 4.4:** Vergleich der mit CFAST unter Verwendung höherer Abbrand-/Wärmefreisetzungsraten ermittelten äquivalenten Branddauern mit dem Bemessungsdiagramm Bild A 3-1 nach KTA 2101.2 /KTA 00/ ( $A_V = 2 \text{ m}^2$  (rote Dreiecke) entspricht den Randbedingungen für den Grundwert  $t_{\ddot{a},0}$ )

Der Faktor  $f_{AV}$  stellt das Verhältnis  $t_{\ddot{a}}$  zu  $t_{\ddot{a},0}$  dar. Um Rohdaten für den Verlauf von  $f_{AV}$  zu erhalten, wurde in der Abb. 4.5 die äquivalente Branddauer bei einer gegebenen Öff-

nungsfläche  $A_V$  in Bezug zur äquivalenten Branddauer  $t_{ä,0}$  (d. h.  $A_V = 2 \text{ m}^2$  bzw.  $A_{V,eff,neu} / A = 2,2 \%$ ) gesetzt. Wie schon in Abb. 4.4 zu erkennen ist, wird für größere Öffnungsflächenverhältnisse als  $A_{V,eff,neu} / A = 2,2 \%$  tendenziell eine höhere äquivalente Branddauer festgestellt. Der Effekt wird insbesondere bei höheren Brandbelastungen deutlich. Bei kleinen Brandbelastungen führen die hohen Abbrandraten bei großen Öffnungsflächenverhältnissen offensichtlich zu relativ kurzen Branddauern der Naturbrände, sodass die äquivalenten Branddauern ebenfalls sinken.

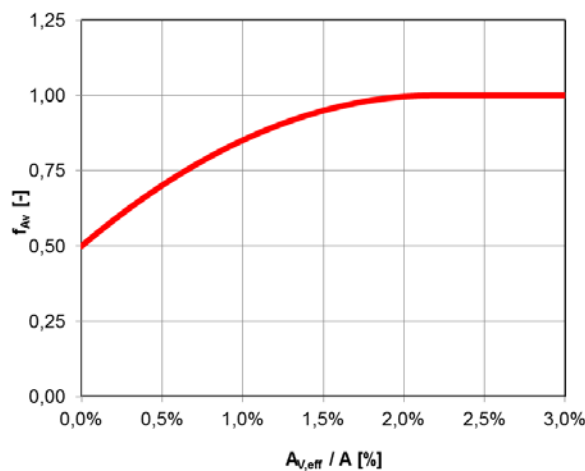


**Abb. 4.5:** Rohdaten für den Faktor  $f_{AV}$  aus dem Verhältnis der äquivalenten Branddauern für verschiedene Brandbelastungen

## 5 Erläuterungen zur Änderung des Faktors $f_{AV}$ im Anhang A der KTA 2101.2

Für den Faktor  $f_{AV}$  haben sich im Regeländerungsentwurf 2102.2, Fassung 2014-11 /KTA 14/, gegenüber der KTA 2101.2, Fassung 2000-12, folgende Änderungen ergeben:

Der Basiswert der Ventilation, für den  $f_{AV} = 1$  erreicht wird, hat sich durch die Anpassung des Äquivalenzfaktors in Gl. A 3-4 von 6000 auf 2200 von  $A_{V,eff,alt} / A = 1,6 \%$  auf  $A_{V,eff,neu} / A = 2,2 \%$  verschoben. Hinweis: Durch diese Streckung des Verlaufs von  $f_{AV}$  wird für einen gegebenen Wert  $A_{V,eff,neu} / A$  ein geringerer Wert  $f_{AV,neu}$  bestimmt, z. B.  $f_{AV,neu} (A_{V,eff,neu} / A = 1,5 \%) = 0,93$  gegenüber  $f_{AV,alt} (A_{V,eff,alt} / A = 1,5 \%) = 0,99$ . Diese Änderung ist beabsichtigt, da innerhalb der zu Grunde liegenden Brandsimulation der Einfluss der mechanischen Ventilation zuvor unterschätzt wurde.



**Abb. 5.1:** Verlauf des Faktors  $f_{AV}$  als Ersatz für Bild A 3-3 des vereinfachten Nachweisverfahrens /KTA 14/

Da der ansteigende Ast ( $0 \% < A_{V,eff} / A < 2,2 \%$ ) per Konvention den Startpunkt  $f_{AV} = 0,5$  bei  $A_{V,eff} / A = 0,0 \%$  besitzt, wurde der Verlauf durch eine quadratische Funktion idealisiert, die bei  $A_{V,eff,neu} / A = 2,2 \%$  die Steigung 0 aufweist. Diese lautet:

$$f_{AV} = -1033 (A_{V,eff} / A - 0,022)^2 + 1 \quad \text{für: } A_{V,eff} / A \leq 0,022.$$

Für  $A_{V,eff,neu} / A > 2,2 \%$  wurde der Faktor bei  $f_{AV} = 1,0$  belassen und der Anwendungsbereich auf  $A_{V,eff,neu} / A \leq 3,0 \%$  begrenzt. Die Vergleichsrechnungen mit CFAST haben gezeigt, dass insbesondere für höhere Brandbelastungen die äquivalente Branddauer gegenüber dem Vergleichswert für  $A_{V,eff,neu} / A = 2,2 \%$  steigt (vgl. Abb. 4.5). Da aber ebenfalls gezeigt wurde, dass der Basiswert  $t_{\ddot{a},0}$  konservativ festgelegt ist, wird im Bereich  $2,2 \% < A_{V,eff,neu} / A < 3,0 \%$  von dieser Überbemessung Kredit genommen. Bei  $A_{V,eff,neu} / A = 3,0 \%$  ist die Überbemessung soweit aufgezehrt, dass eine Anwendungsgrenze definiert wurde. Es wird davon ausgegangen, dass für typische kernkraftwerk-spezifische Räume die Randbedingung  $A_{V,eff,neu} / A < 3,0 \%$  erfüllt ist. Falls diese Randbedingung nicht erfüllt ist, ist eine genauere Ermittlung der äquivalenten Branddauer unter Verwendung der spezifischen Randbedingungen erforderlich. Hierzu eignet sich u. a. das verwendete Modell CFAST.

Das Verfahren beruht darauf, dass der Anwender zur Ermittlung der bezogenen effektiven Gesamtöffnungsfläche  $A_{V,eff} / A$  die Nennwerte der vertikalen Öffnungsflächen  $A_V$  und des mechanischen Zuluftvolumenstroms  $\dot{V}_{Zu}$  für planmäßige sowie unplanmäßige Bedingungen einsetzt. Sowohl der Beitrag aus natürlicher, als auch aus mechanischer Ventilation sind unter Berücksichtigung realer Randbedingungen von Bränden in kernkraftwerkspezifischen Räumen konservativ gewählt. Die natürliche Ventilation über  $A_V$  ist tendenziell geringer als in den Brandsimulationen angenommen, da die vertikale Öffnung in der Regel nicht ins Freie, sondern in angrenzende Gebäudebereiche mündet, wo sich andere Druckverhältnisse und Sauerstoffkonzentrationen einstellen. Der mechanische Zuluftvolumenstrom wird tendenziell durch die thermische Ausdehnung der Gase im Brandraum gegenüber dem Nennwert reduziert.

Aus diesen Gründen wird die bezogene effektive Gesamtöffnungsfläche  $A_{V,eff} / A$  ebenfalls tendenziell überschätzt. Durch den nun gewählten monoton-steigenden Verlauf des Faktors  $f_{AV}$  wird dieser Faktor in der Folge tendenziell konservativ festgelegt. Der Verlauf des Faktors  $f_{AV}$  wird auch dem Konzept der Brandbekämpfungsmaßnahmen in Kernkraftwerken gerecht, die neben Löschmaßnahmen den Lüftungsabschluss des Brandraums vorsehen, also kleine Werte  $A_{V,eff} / A$  zum Ziel haben.

In /FOR 15/ wird ein Vergleich des Bemessungsverfahrens nach KTA mit dem t-äquivalent-Verfahren nach Eurocode 1 bzw. nach DIN 18230-1 angestellt. Dabei zeigt sich, dass der Grundwert  $t_{\ddot{a},0}$  der äquivalenten Branddauer gemäß KTA konservativ bestimmt wird und dass der Faktor  $f_{AV}$  die Randbedingungen in Kernkraftwerken deutlich besser abdeckt als der Ventilationsfaktor der konventionellen Normen.

## Literaturverzeichnis

- /BLU 14/ Blume, G.: persönliche Mitteilung, 2014.
- /DIN 10/ Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 18230-1: Baulicher Brandschutz im Industriebau – Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer, September 2010.
- /DIN 10a/ Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN EN 1991-1-2/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke, Dezember 2010.
- /DRY 98/ Drysdale, D.: An Introduction to Fire Dynamics. 2. Auflage, Wiley & Sons, Chichester, 1998.
- /FOR 13/ Forell, B.: Recent Considerations on the Fire Barrier Resistance Rating for German Nuclear Power Plants. in: Röwekamp, M., H.-P. Berg (Hrsg.): Proceedings of SMiRT 22, 13<sup>th</sup> International Seminar on Fire Safety in Nuclear Power Plants and Installations, September 18-20, 2013, Columbia, SC, USA, GRS-A-3731, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Germany, Dezember 2013, <http://www.grs.de/sites/default/files/pdf/grs-a-3731.pdf>.
- /FOR 15/ Forell, B.: Recent Amendments of the KTA 2101.2 Fire Barrier Resistance Rating Method for German NPP and Comparison to the Eurocode T-equivalent Method, in: Röwekamp, M., H.-P. Berg (Hrsg.): Proceedings of SMiRT 23, 14<sup>th</sup> International Seminar on Fire Safety in Nuclear Power Plants and Installations, August 17-18, 2015, Salford, United Kingdom; Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln, Germany, Entwurf, August 2015.
- /HOS 96/ Hosser, D., et al.: Untersuchungen zur Regelfähigkeit von brandschutztechnischen Nachweisen im Rahmen von KTA 2101.2. Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-1996-467, ISSN 0724-3316.

- /HOS 98/ Hosser, D., et al.: Untersuchungen zur Regelfähigkeit von brandschutz-technischen Nachweisen im Rahmen von KTA 2101.2 – Ermittlung effektiver Heizwerte, Untersuchung im Auftrag des BMU, Aktenzeichen SR 2226-81225-UA-1457, Braunschweig, Juni 1998.
- /HOS 01/ Hosser, D., G. Blume: Vereinfachtes Nachweisverfahren zur Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen (KTA 2101.2, Anhang A). Foli-  
enpräsentation zum Vortrag auf dem KTA-Regelseminar zum Brandschutz  
in Kernkraftwerken am 3. Dezember 2001, Köln.
- /KTA 00/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): Sicherheitstechnische Regel des KTA:  
KTA 2101, Brandschutz in Kernkraftwerken, Teil 1-3, Fassung 12/00, De-  
zember 2000,  
[http://www.kta-gs.de/d/regeln/2100/2101\\_1\\_r\\_2000\\_12.pdf](http://www.kta-gs.de/d/regeln/2100/2101_1_r_2000_12.pdf),  
[http://www.kta-gs.de/d/regeln/2100/2101\\_2\\_r\\_2000\\_12.pdf](http://www.kta-gs.de/d/regeln/2100/2101_2_r_2000_12.pdf),  
[http://www.kta-gs.de/d/regeln/2100/2101\\_3\\_r\\_2000\\_12.pdf](http://www.kta-gs.de/d/regeln/2100/2101_3_r_2000_12.pdf).
- /KTA 14/ Regeländerungsentwurf zur KTA 2101, Brandschutz in Kernkraftwerken,  
Teil 2: Brandschutz an baulichen Anlagen. BAnz AT 05.12.2014 („Grün-  
druck“), Beschlussfassung der 69. KTA-Sitzung vom 11.11.2014.
- /NAB 10/ Normenausschuss Bau (NAB): Baulicher Brandschutz im Industriebau –  
Teil 4: Ermittlung der äquivalenten Branddauer und des Wärmeabzugs  
durch Brandsimulation. Normungsvorhaben, Dokument NA 005-52-41 AA  
N 109, Entwurf, Stand Dezember 2010.
- /NRC 07/ U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC)/Electric Power Research Insti-  
tute (EPRI) (Hrsg.): Verification & Validation of Selected Fire Models for  
Nuclear Power Plant Applications Volume 3: Fire Dynamics Tools (FDTS),  
NUREG-1824, EPRI 1011999, Final Report, Mai 2007.
- /PEA 13/ Peacock, R. D., P. A. Reneke, G. P. Forney: CFAST - Consolidated Model  
of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6), User`s Guide, National  
Institute of Standards and Technology (NIST), NIST Special Publication  
1041r1, Ausgabe Dezember 2012, Stand März 2013.



- /PEA 13a/ Peacock, R. D., G. P. Forney, P. A. Reneke: CFAST - Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6), Technical Reference Guide, National Institute of Standards and Technology (NIST), NIST Special Publication 1026r1, Ausgabe Oktober 2011, Stand März 2013.
- /SCH 90/ Schneider, U., M. Kersken-Bradley, U. Max: Neuberechnung der Wärmeabzugsfaktoren  $w$  für die DIN V 18230 Teil 1 – Baulicher Brandschutz im Industriebau. Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit, München / Kassel, Mai 1990.
- /UPM 01/ Upmeyer, J.: Nachweis der Brandsicherheit von kammerbetonierten Verbundbauteilen über Grenzbrandlasten. Universität Hannover, Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau, Band 19 (zgl. Dissertationsschrift), Hannover 2001.



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1:	Korrekturfaktor $f_{AV}$ mit dem aus den Brandsimulationen resultierenden Verlauf (gestrichelt) und dem in der KTA 2101.2 übernommenen Verlauf (durchgezogen) (Bild 6.3 aus /HOS 96/)	8
Abb. 3.2:	Abbrandrate (untere Kurve) und äquivalente Branddauer (obere Kurve) bei Ölbränden in einem Raum mit 2,5 m Höhe bei variiertem Ventilationsöffnung $A_V$ (Bild 4.5 aus /HOS 96/)	9
Abb. 3.3:	Abbrandrate (untere Kurve) und äquivalente Branddauer (obere Kurve) bei großflächigen Ölbränden in einem Raum mit 2,5 m Höhe bei variiertem Ventilationsöffnung $A_V$ (Bild 4.9 aus /HOS 96/)	10
Abb. 3.4:	Abbrandrate (untere Kurve) und äquivalente Branddauer (obere Kurve) bei großflächigen Ölbränden in einem Raum mit 5,0 m Höhe bei variiertem Ventilationsöffnung $A_V$ (Bild 4.10 aus /HOS 96/)	10
Abb. 4.1:	Verlauf der ETK und des im Referenzraum simulierten Temperaturverlaufs (3600 s = 1 h)	16
Abb. 4.2:	Vergleich der Erwärmung des Vergleichsbauwerks nach /HOS 96/ (dort Bild 4.1) mit den Ergebnissen der CFAST-Simulation (rote, überlagerte Linie)	17
Abb. 4.3:	Vergleich der ermittelten äquivalenten Branddauern nach /HOS 96/ (dort Bild 4.9, schwarz) mit den Ergebnissen der CFAST-Simulation $t_{\ddot{a}q}$ (grüne Linie) und $t_{\ddot{a}q}(\text{Hass})$ (blaue Linie)	18
Abb. 4.4:	Vergleich der mit CFAST unter Verwendung höherer Abbrand-/Wärmefreisetzungsraten ermittelten äquivalenten Branddauern mit dem Bemessungsdiagramm Bild A 3-1 nach KTA 2101.2 /KTA 00/ ( $A_V = 2 \text{ m}^2$ (rote Dreiecke) entspricht den Randbedingungen für den Grundwert $t_{\ddot{a},0}$ )	21
Abb. 4.5:	Rohdaten für den Faktor $f_{AV}$ aus dem Verhältnis der äquivalenten Branddauern für verschiedene Brandbelastungen	22

Abb. 5.1: Verlauf des Faktors  $f_{AV}$  als Ersatz für Bild A 3-3 des vereinfachten Nachweisverfahrens /KTA 14/ ..... 23

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Thermische Stoffwerte der Umfassungsbauteile (nach /HOS 96/, Tabelle 2.2).....	3
Tab. 3.1:	Auswertung der drei Parameterstudien bzgl. vertikaler Öffnungsgröße bei maximaler äquivalenter Branddauer ( $A_v$ ( $t_{\dot{a}} =$ max)), Abbrandrate bei maximaler äquivalenter Branddauer (MLR ( $t_{\dot{a}} = \text{max}$ )) und Wärmefreisetzung pro Grundfläche bei maximaler äquivalenter Branddauer ( $\text{HRR} / A$ ).....	12



# Anhang 1: Anhang A aus KTA 2101.2, Fassung 2000-12

## A 1 Grundlagen für den Nachweis

Das im folgenden beschriebene vereinfachte Nachweisverfahren darf zur Ermittlung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer von bautechnischen Brandschutzmaßnahmen herangezogen werden (siehe hierzu auch [1]).

Grundlage des Nachweises sind Raumlisten mit Angaben zur Geometrie der Räume, zu den Massen und Heizwerten der brennbaren Stoffe, sowie zu den Ventilationsverhältnissen aufgrund von Öffnungen, die im Brandfall planmäßig oder unplanmäßig offen stehen können, oder aufgrund einer Zwangsventilation mit einem vorgegebenen Volumenstrom.

Im Einzelnen werden folgende Eingangsgrößen benötigt:

- a) die Raumgröße A in m<sup>2</sup>,
- b) die Raumhöhe H in m,
- c) die Summe natürlicher Ventilationsöffnungen A<sub>V</sub> in m<sup>2</sup>,
- d) der Zuluftvolumenstrom der Zwangsventilation  $\dot{V}_{zu}$  in m<sup>3</sup>/h,
- e) die Massen M<sub>i</sub> in kg der ungeschützt vorliegenden brennbaren Stoffe (Öl, Kabel usw.) sowie deren Heizwerte H<sub>ui</sub> in kWh/kg,
- f) die Massen M<sub>j</sub> der durch Einschluss in Behältern, geschlossenen Systemen oder durch sonstige Umschließungen (z. B. Dämmschichtbildner bei Kabeln) gegen Entzündung geschützten brennbaren Stoffe.

Als Kriterium für die zu erwartende Brandbeanspruchung von Bauteilen aufgrund des natürlichen Brandverlaufes dient die äquivalente Branddauer t<sub>ä</sub> nach DIN 18230-1, die in Abhängigkeit einer rechnerischen Brandbelastung q<sub>R</sub> bestimmt wird.

## A 2 Rechnerische Brandbelastung q<sub>R</sub>

Die rechnerische Brandbelastung q<sub>R</sub> in kWh/m<sup>2</sup> wird ermittelt aus den Einzelmassen M<sub>i</sub>, den Heizwerten H<sub>ui</sub> und den Verbrennungseffektivitäten X<sub>i</sub> der ungeschützten brennbaren Stoffe sowie den entsprechenden Werten M<sub>j</sub>, H<sub>uj</sub> und X<sub>j</sub> der geschützten brennbaren Stoffe, gegebenenfalls unter Berücksichtigung von Energieverlusten ΔQ<sub>W</sub> an Wärmesenken.

$$q_R = (Q_U + Q_G - \Delta Q_W) / A \quad (A 2-1)$$

mit

$$Q_U : \text{Summe der ungeschützten Brandlasten in kWh} \\ = \sum (M_i \cdot H_{ui} \cdot X_i) \quad (A 2-2)$$

$$Q_G : \text{Summe der geschützten Brandlasten in kWh} \\ = \sum (M_j \cdot H_{uj} \cdot X_j \cdot \psi_j) \quad (A 2-3)$$

ΔQ<sub>W</sub> : Summe der Energieverluste an Wärmesenken gemäß Abschnitt A 4 in kWh

Für einige häufig vorkommende brennbare Stoffe können die Heizwerte H<sub>ui</sub> und die Verbrennungseffektivitäten X<sub>i</sub> der **Tabelle A 2-1** entnommen werden.

Bei Mischbrandlasten wird - wenn hierfür genauere Werte fehlen - stets das Maximum der Verbrennungseffektivitäten der Einzelstoffe max X<sub>i</sub> für alle brennbaren Stoffe (z. B. im

Falle von Öl-/Kabelbränden X = 1,0 für die Gesamtbrandlast) angenommen.

Hinweis:

Genauere Werte für Mischbrandlasten liegen zur Zeit nicht vor und können nur durch Versuche bestimmt werden.

Nr.	Stoffart <sup>1)</sup>	Stoffgröße		
		Heizwert H <sub>u</sub>		X
		MJ/kg	kWh/kg	
1	Öl	42,0	11,7	1,0
2	PVC-Kabel	18,0	5,0	0,5 <sup>2)</sup>
3	Holzkippen	17,3	4,8	0,75 <sup>2)</sup>
4	Aktivkohle (Holzkohle)	32,8	9,1	1,0 <sup>4)</sup>
5	Hydrauliköl DTE	40,5	11,3	0,8 <sup>2)</sup>
6	Polypropylen	43,9	12,2	0,9 <sup>3)</sup>
7	Papier	13,7	3,8	0,75 <sup>3)</sup>
8	Baumwoll-Putzlappen	31,7	8,8	0,75 <sup>3)</sup>
9	Polyethylen (Granulat)	43,2	12,0	0,8 <sup>2)</sup>
10	Polyethylen mit 25% Chlor	31,6	8,8	0,7 <sup>3)</sup>
11	Gummi (Kautschuk)	42,1	11,7	1,0 <sup>4)</sup>
12	Kaltreiniger (Benzin)	42,8	11,9	≈ 1,0
13	Schmierfett	41,4	11,5	1,0 <sup>4)</sup>
14	Glykol	16,6	4,6	0,8 <sup>2)</sup>
15	Polystyrol	39,2	10,9	0,65 <sup>3)</sup>
16	Methanol	20,0	5,6	0,95 <sup>3)</sup>
17	Heptan	44,6	12,4	0,95 <sup>3)</sup>

- 1) Weitere Stoffarten sind in [2] angegeben
- 2) Experimentell ermittelte Werte nach [3] mit ± 0,1% Streuung
- 3) Werte aus der Literatur (siehe [3])
- 4) Diese Werte sind konservativ. Genauere Werte liegen zur Zeit nicht vor und können nur durch Versuche bestimmt werden.

**Tabelle A 2-1:** Wichtige Stoffgrößen von Brandlasten

Die durch Einschluss in geschlossenen Systemen oder durch sonstige Umschließungen geschützten brennbaren Stoffe dürfen durch Kombinationsbeiwerte ψ<sub>j</sub> abgemindert werden. Ohne genaueren Nachweis wird angenommen:

$$\psi_j = 0,8 \quad \text{für die größte geschützte Einzelbrandlast (A 2-4)}$$

$$\psi_j = 0,55 \quad \text{für weitere geschützte Brandlasten (A 2-5)}$$

Die Berücksichtigung von Wärmesenken erfolgt iterativ. Im ersten Schritt ist ΔQ<sub>W</sub> = 0 zu setzen; zum weiteren Rechengang siehe Abschnitt A 4.

## A 3 Äquivalente Branddauer t<sub>ä</sub>

Die äquivalente Branddauer t<sub>ä</sub> in min wird in Abhängigkeit der rechnerischen Brandbelastung q<sub>R</sub> gemäß Gleichungen (A 2-1)

bis (A 2-3) unter Berücksichtigung der vorhandenen Raumhöhe  $H$  und der Ventilationsverhältnisse im Brandraum wie folgt berechnet:

$$t_a = t_{a,0} \cdot f_H \cdot f_{AV} \quad (\text{A 3-1})$$

mit

$t_{a,0}$  : Grundwert der äquivalenten Branddauer [min] bei ungünstigster Ventilation und einer Raumhöhe von  $H_{ref} = 2,5$  m

$f_H$  : Korrekturfaktor für andere Raumhöhen  $H$

$f_{AV}$  : Korrekturfaktor für die tatsächlichen Ventilationsverhältnisse

Der Grundwert  $t_{a,0}$  ist aus dem Bemessungsdiagramm in **Bild A 3-1** oder **Bild A 3-2** (gleicher Inhalt in unterschiedlichem Maßstab) abzulesen.

In **Bild A 3-1** und **Bild A 3-2** werden folgende Fälle unterschieden:

- gleichmäßig verteilte Brandlast, Brand im gesamten Raum,
- ungleichmäßig verteilte Brandlast, Brand auf einer größeren Teilfläche,
- Punktbrandlast, lokal begrenzter Brand der gesamten Brandlast.

Der Korrekturfaktor  $f_H$  für eine andere Raumhöhe als die Referenzraumhöhe  $H_{ref}$  ist nach Gleichung (A 3-2) zu berechnen:

$$f_H = \left[ \frac{H_{ref}}{H} \right]^{0,3} \quad (\text{A 3-2})$$

Der Korrekturfaktor  $f_{AV}$  für die vorhandene Ventilation kann in Abhängigkeit einer bezogenen effektiven Gesamtöffnungsfläche  $A_{V,eff}/A$  aus **Bild A 3-3** abgelesen werden

$$f_{AV} = f(A_{V,eff} / A) \quad (\text{A 3-3})$$

mit

$$A_{V,eff} = A_V + \dot{V}_{zu} / 6000 \quad \text{in m}^2 \quad (\text{A 3-4})$$

$A_V$  : Gesamtfläche der vertikalen Öffnungen in den Umfassungswänden in  $\text{m}^2$

$\dot{V}_{zu}$  : Zuluftvolumenstrom bei vorhandener Zwangsventilation in  $\text{m}^3/\text{h}$

#### A 4 Berücksichtigung von Wärmesenken

Der Einfluss von Energieverlusten an vorhandenen Wärmesenken im Brandraum, z. B.

- Betonbauteile wie Trennwände, Stützen u. ä. ( $Q_B$ )
- Stahlbauteile wie Auflager- und Unterstützungsstrukturen, Schalen u. ä. ( $Q_S$ )
- großvolumige Behälter für Flüssigkeiten ( $Q_F$ )

auf die zu erwartenden Brandwirkungen darf als Gesamtenergieverlust  $\Delta Q_W$  in Gleichung (A 2-1) berücksichtigt werden. Dabei ist

$$\Delta Q_W = \sum Q_{W,i} \quad (\text{A 4-1})$$

mit

$$Q_{W,i} = Q_B, Q_S \text{ oder } Q_F \quad \text{in kWh}$$

Die Energieverluste  $Q_{W,i}$  dürfen generell wie folgt ermittelt werden:

$$Q_{W,i} = M_W \cdot c_{p,W} \cdot (\bar{T}_{SW} - T_0) \cdot 1/(3,6 \cdot 10^6) \quad (\text{A 4-2})$$

mit

$M_W$  : Masse des Bauteils in kg

$c_{p,W}$  : spezifische Wärmekapazität des Bauteils in  $\text{J}/(\text{kg K})$

$\bar{T}_{SW}$  : kalorische Mitteltemperatur des Bauteils in  $^\circ\text{C}$

$T_0$  : Betriebstemperatur des Bauteils in  $^\circ\text{C}$

Die kalorische Mitteltemperatur  $\bar{T}_{SW}$  kann aus **Bild A 4-1** abgelesen werden in Abhängigkeit der zuvor (ohne Wärmesenken) berechneten äquivalenten Branddauer  $t_a$  und eines Scharparameters  $\sigma_W$  in  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$

$$\sigma_W = \left( \frac{\alpha_W}{\rho_W \cdot c_{p,W}} \right) \cdot \left( \frac{A_W}{V_W} \right) \quad (\text{A 4-3})$$

mit

$A_W$  : brandbeanspruchte Oberfläche des Bauteils in  $\text{m}^2$

$V_W$  : Bauteilvolumen in  $\text{m}^3$

$A_W/V_W$  : Profilfaktor in  $\text{m}^{-1}$  (analog U/A nach DIN 4102-4 Abschnitt 6.1.2)

$\alpha_W$  : Wärmeübergangskoeffizient in  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

$\rho_W$  : Dichte des Bauteils in  $\text{kg}/\text{m}^3$

$c_{p,W}$  : spezifische Wärmekapazität des Bauteils in  $\text{J}/(\text{kg K})$

Die wärmetechnischen Kennwerte für die in Frage kommenden Stoffe können **Tabelle A 4-1** entnommen werden.

Stoff	$\alpha_W$ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$\rho_W$ $\text{kg}/\text{m}^3$	$c$ $\text{J}/(\text{kg K})$
Beton	20	2200	879
Stahl	20	7850	600
Wasser	–	1000	4182
Öl	–	910	1880

**Tabelle A 4-1:** Wärmetechnische Kennwerte verschiedener Stoffe

Anstelle von **Bild A 4-1** darf die kalorische Mitteltemperatur  $\bar{T}_{SW}$  auch aus Gleichung (A 4-4) bestimmt werden:

$$\bar{T}_{SW} = T_g [1 - \exp(-s_w \times 60 \times t_a)] \quad (\text{A 4-4})$$

mit

$\sigma_W$  : Scharparameter gemäß Gleichung (A 4-5) in  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$

$t_a$  : äquivalente Branddauer in min, im ersten Schritt ohne  $\Delta Q_W$  ermittelt

$T_g$  : Heißgastemperatur des Normbrandes in  $^\circ\text{C}$  nach einer Branddauer von  $t_a$

$$T_g = 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t_a + 1) \quad (\text{A 4-5})$$

Bei der Ermittlung von Energieverlusten  $Q_F$  an mit Flüssigkeit gefüllten Behältern werden gewichtete Mittelwerte für die Dichte  $\bar{\rho}_F$  und die spezifische Wärmekapazität  $\bar{c}_{p,F}$  eingesetzt:

$$\bar{\rho}_F = \mu_{BE} \cdot \rho_{BE} + \mu_{FL} \cdot \rho_{FL} \quad (\text{A 4-6})$$

$$\bar{c}_{p,F} = \mu_{BE} \cdot c_{p,BE} + \mu_{FL} \cdot c_{p,FL} \quad (\text{A 4-7})$$

mit

$c_{p,BE}$  : spezifische Wärmekapazität der Behälterwandung in  $\text{J}/(\text{kg K})$



$c_{p,FL}$  : spezifische Wärmekapazität der Flüssigkeit in J/(kg K)

$\rho_{BE}$  : Dichte der Behälterwandung in kg/m<sup>3</sup>

$\rho_{FL}$  : Dichte des Flüssigkeitsinhaltes in kg/m<sup>3</sup>

$$\mu_{BE} = \frac{M_{BE}}{M_{ges}}; \quad \mu_{FL} = \frac{M_{FL}}{M_{ges}} \quad (A\ 4-8)$$

$$M_{BE} = A_F \cdot d_{BE} \cdot \rho_{BE} \quad (A\ 4-9)$$

$$M_{FL} = V_F \cdot \rho_{FL} \cdot h/100 \quad (A\ 4-10)$$

$$M_{ges} = M_{BE} + M_{FL} \quad (A\ 4-11)$$

mit

$A_F$  : Oberfläche des Behälters in m<sup>2</sup>

$d_{BE}$  : Wandstärke der Behälterwandung in m

$V_F$  : Behältervolumen in m<sup>3</sup>

$h$  : durchschnittlicher Füllgrad des Behälters in %

**A 5 Erforderliche Feuerwiderstandsdauer erf  $t_f$**

Die erforderliche Feuerwiderstandsdauer erf  $t_f$  [min] der bautechnischen Brandschutzmaßnahmen ergibt sich aus der äquivalenten Branddauer  $t_a$  durch Multiplikation mit einem Sicherheitsbeiwert  $\gamma$ .

$$erf\ t_f = \gamma \cdot t_a \quad (A\ 5-1)$$

Der Sicherheitsbeiwert  $\gamma$  ist unter Berücksichtigung der Bedeutung der zu bemessenden Bauteile, der vorgesehenen Brandbekämpfungsmaßnahmen und der zugrundegelegten Ventilationsverhältnisse aus der **Tabelle A 5-1** zu entnehmen.

Brandbekämpfung Kategorie	Ventilation	Sicherheitsbeiwert $\gamma$ für Brandsicherheitsklasse		
		SK <sub>b</sub> 3	SK <sub>b</sub> 2	SK <sub>b</sub> 1
A	p	1,45	1,10	0,7
	u	0,85	0,50	0,5
B	p	1,35	1,00	0,6
	u	0,80	0,50	0,5
C	p	1,10	1,00	0,5
	u	0,50	0,50	0,5
D	p	0,75	0,50	0,5
	u	0,50	0,50	0,5
p : planmäßig		u : unplanmäßig		

**Tabelle A 5-1:** Sicherheitsbeiwerte  $\gamma$  für die Bemessung von bautechnischen Brandschutzmaßnahmen in Kernkraftwerken

Hinsichtlich der Wirksamkeit der Brandbekämpfung werden folgende 4 Kategorien berücksichtigt:

- a) Kategorie A: manuelle Brandbekämpfung nach Klärung der Situation vor Ort; Einsatz größer als 10 min nach Brandentstehung

- b) Kategorie B: manuelle Brandbekämpfung durch vor Ort befindliches Personal; Einsatz weniger als 10 min nach Brandentstehung
- c) Kategorie C: ortsfeste Löschanlage, manuell ausgelöst; Einsatz weniger als 10 min nach Brandentstehung
- d) Kategorie D: ortsfeste Löschanlage; automatisch ausgelöst oder manuell vor Ort oder von der Warte unmittelbar nach Brandmeldung (kleiner als 2 min).

Bei der Ventilation ist zwischen planmäßigen (p) und unplanmäßigen (u) Ventilationsverhältnissen unterschieden. Bei der planmäßigen Ventilation sind

- a) alle Öffnungen (einschließlich Türen), die im Brandfall offen stehen,
- b) die in den Umfassungsbauteilen zu unterstellenden Leckageöffnungen und
- c) eine vorhandene Zwangsventilation, die im Brandfall weiter betrieben wird

berücksichtigt.

Bei der unplanmäßigen Ventilation sind

- a) das Offenstehen einer im Brandfall planmäßig verschlossenen Tür, z. B. durch Ausfall einer zugelassenen Feststellanlage, oder
- b) der Weiterbetrieb einer planmäßig abzuschaltenden Zwangsventilation sowie zusätzlich
- c) die bei der planmäßigen Ventilation genannten Leckageöffnungen

berücksichtigt.

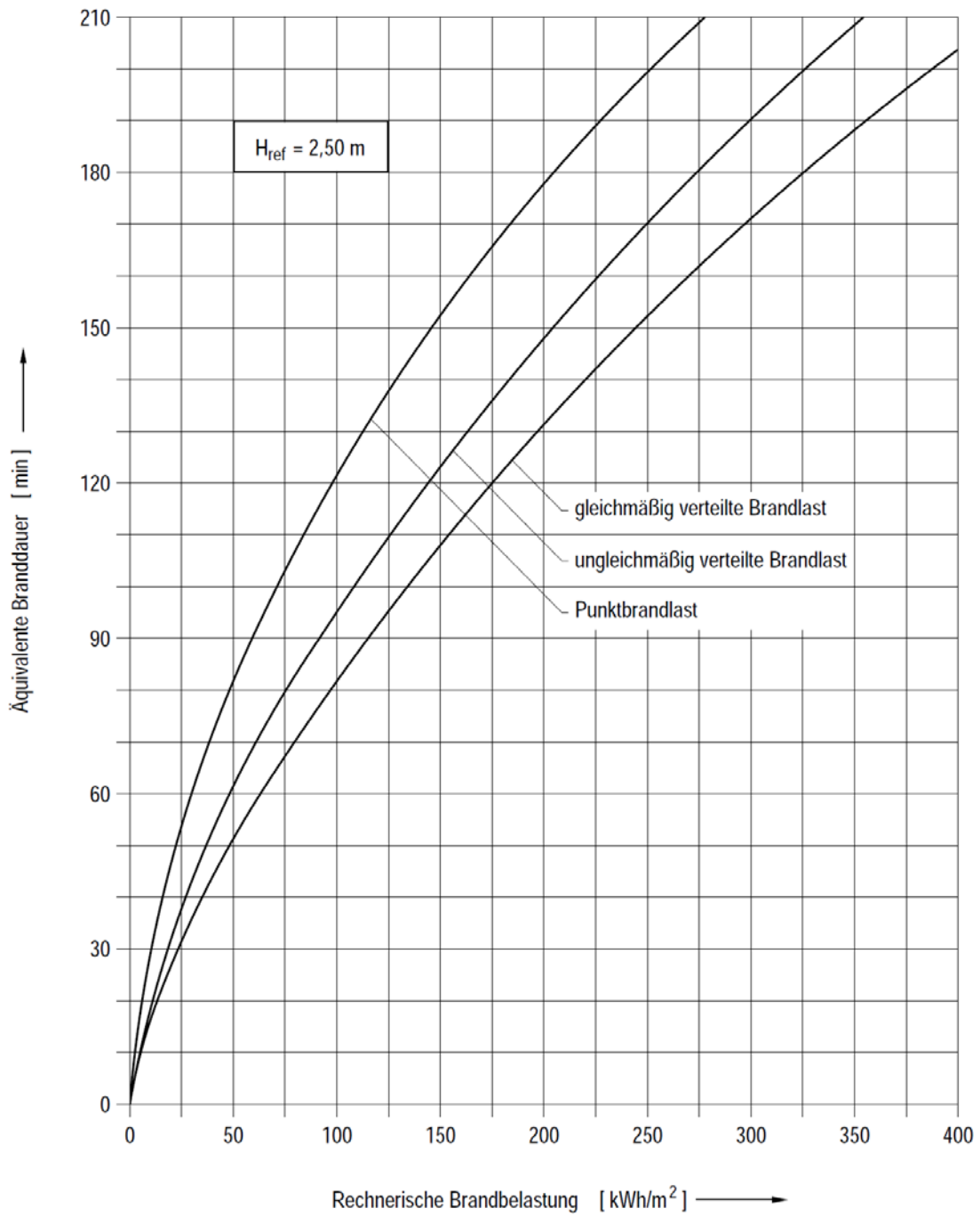
**Hinweis:**  
Die bei der planmäßigen Ventilation

- a) genannten Öffnungen umfassen auch solche, die im Brandfall mit einer größeren Wahrscheinlichkeit offen stehen können, z. B. Blockieren der Brandschutztüren.
- b) genannte vorhandene Zwangsventilation umfasst auch solche, wenn ihre Abschaltung oder Abspernung im Brandfall nicht eindeutig geregelt ist, z. B. in der Brandschutzordnung.

Bezüglich der zu bemessenden Bauteile sind diese wie folgt in drei Brandsicherheitsklassen SK<sub>b</sub> 1 bis SK<sub>b</sub> 3 eingestuft:

- a) SK<sub>b</sub> 1: untergeordnete Bauteile mit Feuerwiderstandsanforderungen, z. B. Teile des Nebentragwerks.
- b) SK<sub>b</sub> 2: Abschlüsse von Öffnungen oder Abschottungen von Leitungsdurchführungen in trennenden Bauteilen,
- c) SK<sub>b</sub> 3: Bauteile, die Brandabschnitte sowie Brandbekämpfungsabschnitte trennen oder die trennende Bauteile unterstützen sowie alle Bauteile des Haupttragwerks.

**Hinweis:**  
Die Zuordnung zu Brandsicherheitsklassen entspricht DIN 18230-1; dort sind noch weitere Details zu ersehen. Wenn das erforderliche Sicherheitsniveau, insbesondere in bestehenden Anlagen, durch andere Maßnahmen (z. B. zusätzliche organisatorische Brandschutzmaßnahmen) gewährleistet wird, kann eine Rückstufung um jeweils eine Brandsicherheitsklasse erfolgen (z. B. SK<sub>b</sub> 3 in SK<sub>b</sub> 2).



**Bild A 3-2:** Grundwert der äquivalenten Branddauer  $t_{a,0}$  in Abhängigkeit von der rechnerischen Brandbelastung  $q_R$

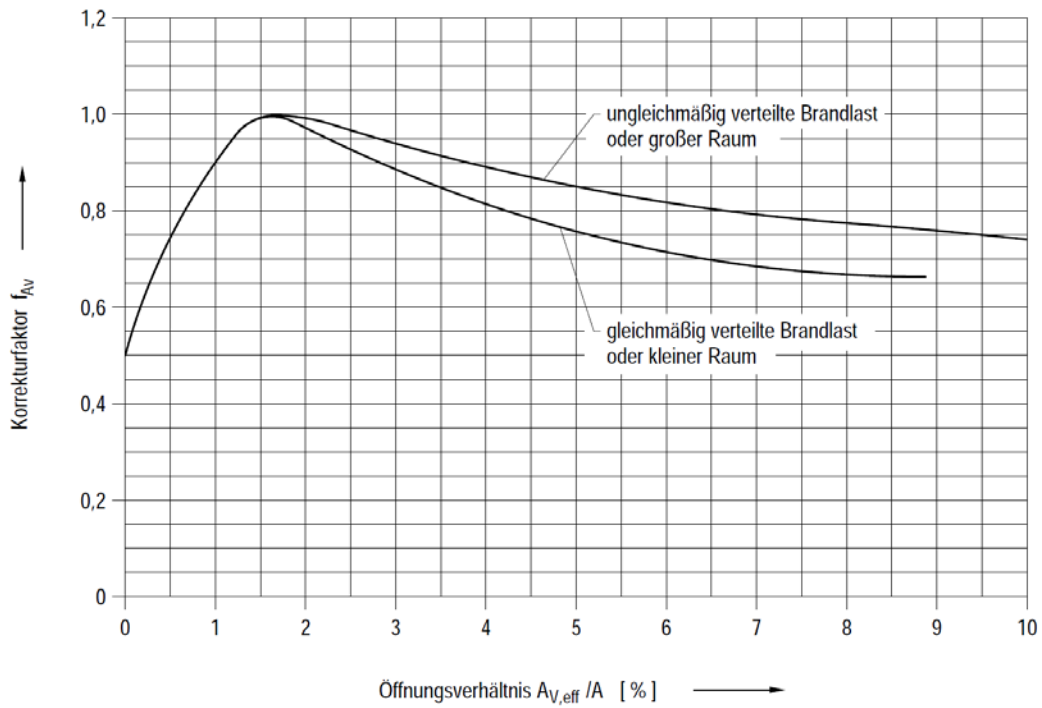


Bild A 3-3: Korrekturfaktor  $f_{AV}$  in Abhängigkeit vom Öffnungsverhältnis  $A_{V,eff}/A$

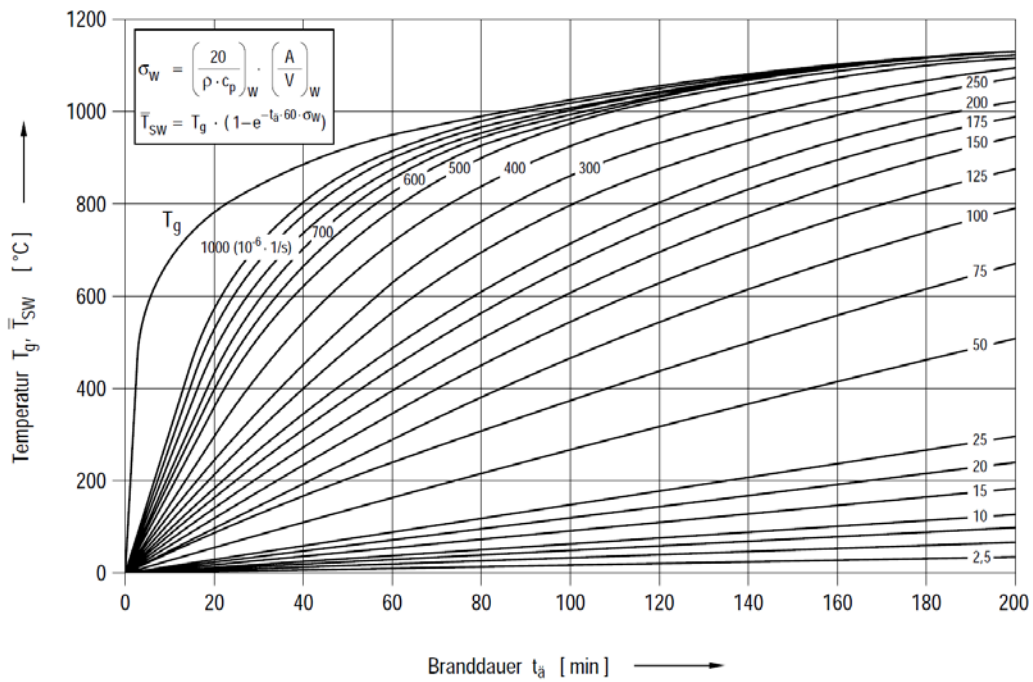


Bild A 4-1: Kalorische Mitteltemperatur  $\bar{T}_{SW}$  als Funktion von  $t_a$ ; Scharparameter  $\sigma_w$

## Literatur

- [1] Hosser, D. et. al.  
Untersuchungen zur Regelfähigkeit von brandschutztechnischen Nachweisen im Rahmen von KTA 2101.2 (Abschlußbericht). Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-1996-467, im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Februar 1996, ISSN 0724-3316
- [2] Schneider, U.  
Festlegung von Brandszenarien für den Entwurf von Gebäuden und für die Risikobetrachtung. VdS-Fachtagung „Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz“ am 25. und 26. April 1995 in Köln.
- [3] Hosser, D.; Blume, G.; Siegfried, W.; Will, J.  
Untersuchungen zur Regelfähigkeit von brandschutztechnischen Nachweisen im Rahmen von KTA 2101.2 - Ermittlung effektiver Heizwerte; Untersuchung im Auftrag des BMU, Aktenzeichen SR 2226-81225-UA-1457

## Anhang 2: Anwendungsbeispiele

Hinweis: Die Anwendungsbeispiele werden mit dem Nachweisverfahren, Stand November 2014 („Gründruck“), /KTA 14/ berechnet.

### Beispiel A

#### Erforderliche Feuerwiderstandsdauer für eine Deckenluke in einem Kabelkanal aus Beton

##### Szenario

Der Betonkabelkanal hat eine Grundfläche von  $A = 100 \text{ m}^2$  und eine Höhe von  $H = 4 \text{ m}$ . Die Brandbelastung aus gleichmäßig verteilten PVC-Kabeln beträgt  $150 \text{ kWh/m}^2$ . Der mechanische Zuluftstrom beträgt  $\dot{V}_{zu} = 440 \text{ m}^3/\text{h}$ . Die Abfuhr der Zuluft erfolgt über eine  $A_v = 2 \text{ m}^2$  große Brandschutztür mit zugelassener Türfeststellanlage. Im Brandfall fährt planmäßig die Zuluft zu und die Brandschutztür schließt. Es befinden sich keine Einbauten im Brandraum, die als Wärmesenke angesetzt werden können. Der Notausstieg aus dem Kanal kann über eine  $A_{Luke} = 1 \text{ m}^2$  große Deckenluke erfolgen, für die die Bemessung zu überprüfen ist. Daneben werden noch  $A_{Leckage} = 0,05 \text{ m}^2$  Leckageflächen an den raumabschließenden Bauteilen wie Rohr- und Kabelabschottungen angesetzt. Die Brandbekämpfung erfolgt durch die Feuerwehr nach mehr als 10 min nach Brandentstehung.

##### Brandbelastung und Faktor $f_H$

Die Kabelbrandlast ist ungeschützt ( $\Psi_j = 1,0$ ). Für den Feststoffbrand ist nach Tab. A 2-1  $\chi = 0,8$  einzusetzen, sodass die rechnerische Brandbelastung  $q_R = 120 \text{ kWh/m}^2$  beträgt. Der Grundwert der äquivalenten Branddauer beträgt bei vorliegender gleichmäßiger Brandlastverteilung  $t_{\ddot{a},0} = 92 \text{ min}$ . Der Korrekturfaktor für die Raumhöhe beträgt  $f_H = 0,87$ .

### Korrekturfaktor $f_{AV}$

Für den Korrekturfaktor  $f_{AV}$  der Ventilation im Brandfall ist der planmäßige Zustand  $f_{AV,p}$  und der unplanmäßige Einzelfehler  $f_{AV,u}$  zu betrachten.

Da planmäßig die mechanische Zuluft schließt und die Brandschutztür zufällt, ist nur die Leckagefläche von  $0,05 \text{ m}^2$  zu betrachten, entsprechend wird  $A_{V,eff,p} = 0,05 \text{ m}^2$ , sodass  $A_{V,eff,p} / A = 0,0005 = 0,05 \%$ . Der Korrekturfaktor wird  $f_{AV,p} = 0,52$ .

Für den unplanmäßigen Fall wird der ungünstigste Einzelfehler betrachtet. Die möglichen Einzelfehler sind (1) Nichtabschaltung der mechanischen Ventilation, (2) Nichtschließen der Brandschutztür und (3) Aufstehen der Deckenluke. Falls (1) die mechanische Ventilation nicht abschaltet, wird der Luftwechsel durch das Schließen der Brandschutztür stark reduziert. Falls die Brandschutztür (2) nicht schließt, wird diese zur natürlichen Öffnung. Die Betrachtung, dass die Deckenluke (3) aufsteht, ist nicht zielführend, da diese der Bemessungsgegenstand ist. Zudem sind im Nachweisverfahren mit Gl. A 3-4 nur vertikale Öffnungen erfassbar. Für horizontale Öffnungsflächen sind zusätzliche Überlegungen zur brandbedingten Durchströmung der Öffnungen anzustellen bzw. Brandsimulationsmodelle einzusetzen. Der Einzelfehler (2) ist deshalb für den Nachweis relevant. Die unplanmäßige effektive Ventilationsfläche wird entsprechend  $A_{V,eff,u} = 0,05 \text{ m}^2 + 2,0 \text{ m}^2 = 2,05 \text{ m}^2$ , sodass  $A_{V,eff,u} / A = 2,05 \%$ . Der Korrekturfaktor wird  $f_{AV,u} = 1,0$ .

Die äquivalente Branddauer im Betonkanal wird für die beiden Betrachtungsfälle entsprechend

$$t_{\bar{a},p} = t_{\bar{a},0} * f_H * f_{AV,p} = 92 \text{ min} * 0,87 * 0,52 = 41,6 \text{ min} \quad \text{bzw.}$$

$$t_{\bar{a},u} = t_{\bar{a},0} * f_H * f_{AV,u} = 92 \text{ min} * 0,87 * 1,0 = 80,0 \text{ min}$$

### Sicherheitskonzept

Innerhalb des Sicherheitskonzepts ist die Deckenluke als Abschluss einer Öffnung in einer Decke eines Brandbekämpfungsabschnitts in die Klasse SKb 2 einzustufen (s. auch /HOS 96/, S. 60/). Die Brandbekämpfung entspricht der Kategorie A, sodass innerhalb des Sicherheitskonzepts (vgl. /HOS 96/, S. 58), von einer Ausfallwahrscheinlichkeit der manuellen Brandbekämpfung von  $p_2 = 0,8$  ausgegangen wurde. Für diesen

Einzelfall könne aufgrund der sehr guten Erreichbarkeit und Zugänglichkeit des relativ kleinen Brandraums durch die Werkfeuerwehr von einer deutlich geringeren Ausfallwahrscheinlichkeit (Verhinderung eines Vollbrands) ausgegangen werden. Deshalb wird entsprechend des Hinweises in /KTA 14/ zur Festlegung der Brandsicherheitsklassen eine Rückstufung um eine Klasse auf SKb 1 vorgenommen. Die Sicherheitsbeiwerte für die beiden Betrachtungsfälle betragen  $\gamma_p = 0,7$  bzw.  $\gamma_u = 0,50$ .

Die erforderliche Feuerwiderstandsdauer beträgt dann

$$\text{erf } t_f = \text{Max} (t_{\text{ä,p}} * \gamma_p, t_{\text{ä,u}} * \gamma_u) = \text{Max} (29,1 \text{ min}, 40,0 \text{ min}) = 40 \text{ min}$$

### Ergebnis

In diesem Fall ist die unplanmäßige Ventilation bemessungsrelevant. Entsprechend ist die Luke hochfeuerhemmend (T60) auszuführen.

## Beispiel B

### Erforderliche Feuerwiderstandsdauer für zwei Rohrabschottungen in einem Öllagerraum

#### Szenario

Der Öllagerraum hat eine Grundfläche von  $A = 150 \text{ m}^2$  und eine Höhe von  $H = 3,0 \text{ m}$ . Die Brandbelastung besteht aus 1000 kg ausgelaufenen Dieselkraftstoff, der in einer in einer Raumecke befindlichen Auffangwanne über 1/6 des Brandraums verteilt ist. Der mechanische Luftwechsel beträgt  $\dot{V}_{zu} = 4400 \text{ m}^3/\text{h}$ . Im Brandfall wird die Zwangsbelüftung planmäßig geschlossen. Zwei planmäßig geschlossene Brandschutztüren von je  $A_V = 1,95 \text{ m}^2$  sowie eine Leckagefläche an den raumabschließenden Bauteilen von  $A_{\text{Leckage}} = 0,05 \text{ m}^2$  sind vorhanden. Als Wärmesenke im Brandraum wird eine Beton-trennwand  $H = 3,0 \text{ m}$ ,  $W = 3,0 \text{ m}$  und  $T = 0,2 \text{ m}$  wirksam, die an eine freie Seite der Auffangwanne anschließt. Die Brandbekämpfung erfolgt über eine festinstallierte Feuerlöschanlage, die innerhalb von 2 bis 10 min nach Brandentstehung ausgelöst wird.

Die erforderliche Feuerwiderstandsdauer für zwei Rohrabschottungen in Brandbekämpfungsabschnittswänden ist nachzuweisen, von denen sich die erste oberhalb der Auffangwanne und die zweite in der der Auffangwanne gegenüberliegenden Raumwand befindet.

#### Brandbelastung ohne Berücksichtigung der Wärmesenke $\Delta Q_W$

Die Ölbrandlast ( $H_u = 11,7 \text{ kWh/kg}$ ) ist ungeschützt ( $\Psi_j = 1,0$ ). Für den Flüssigkeitsbrand ist  $\chi = 0,9$  einzusetzen, sodass die rechnerische Brandlast  $Q_u = 10530 \text{ kWh}$  und die Brandbelastung  $q_R = 70,2 \text{ kWh/m}^2$  beträgt. Der Grundwert der äquivalenten Branddauer ohne Berücksichtigung der Wärmesenke beträgt bei vorliegender Punktbrandlast (quantitative Kriterien vgl. /HOS 96/, S. 46)  $t_{\ddot{a},0,(1)} = 99 \text{ min}$  und für gleichverteilte Brandlast  $t_{\ddot{a},0,(2)} = 64 \text{ min}$ .

#### Korrekturfaktor $f_{AV}$

Für den Korrekturfaktor  $f_{AV}$  der Ventilation im Brandfall ist der planmäßige Zustand  $f_{AV,p}$  und der unplanmäßige Einzelfehler  $f_{AV,u}$  zu betrachten. Da planmäßig die mechanische Zuluft schließt und die Brandschutztüren zu sind, ist nur die Leckagefläche von  $0,05 \text{ m}^2$



zu betrachten; entsprechend wird  $A_{V,eff,p} = 0,05 \text{ m}^2$ , sodass  $A_{V,eff,p} / A = 0,03 \%$ . Der Korrekturfaktor wird  $f_{AV,p} = 0,515$ . Für den unplanmäßigen Fall wird der ungünstigste Einzelfehler betrachtet. Die möglichen Einzelfehler sind (1) Nichtabschaltung der mechanischen Ventilation (Zu- und Abluft) sowie (2) Aufstehen einer Brandschutztür. Falls (1) die mechanische Ventilation nicht abschaltet, wird  $A_{V,eff,u} = 0,05 \text{ m}^2 + 4400 \text{ m}^2/2200 = 2,05 \text{ m}^2$ . Falls (2) eine Brandschutztür aufsteht, wird  $A_{V,eff,u} = 0,05 \text{ m}^2 + 1,95 \text{ m}^2 = 2,00 \text{ m}^2$ .

Der Einzelfehler (1) ist deshalb für den Nachweis relevant. Damit wird  $A_{V,eff,u} / A = 1,37 \%$ , sodass  $f_{AV,u} = 0,93$ .

Die äquivalente Branddauer im Öllageraum zur Berücksichtigung der Wärmesenke wird für die beiden Betrachtungsfälle entsprechend

$$t_{\dot{a},p,oh\text{-Wärmesenke}} = t_{\dot{a},0} * f_H * f_{AV,p} = 99 \text{ min} * 0,95 * 0,515 = 48,4 \text{ min} \quad \text{bzw.}$$

$$t_{\dot{a},u,oh\text{-Wärmesenke}} = t_{\dot{a},0} * f_H * f_{AV,u} = 99 \text{ min} * 0,95 * 0,93 = 87,5 \text{ min}$$

#### Berücksichtigung der Wärmesenke $\Delta Q_W$ durch die Trennwand im Raum

Da sich die Trennwand direkt neben der Punktbrandlast befindet, kann mit dem hohen Grundwert  $t_{\dot{a},0,(1)} = 99 \text{ min}$  (d. h. die Trennwand nimmt viel Wärme auf) zur Bestimmung des Wertes  $\Delta Q_W$  gerechnet werden.

Die Trennwand hat das Volumen  $1,8 \text{ m}^3$ , die Masse  $3960 \text{ kg}$  und die brandbeanspruchte Oberfläche (hier: beide Seiten  $H * W$  und eine Stirnseite  $H * T$ ) von  $2 * H * W + H * T = 18,6 \text{ m}^2$ . Mit den wärmetechnischen Kennwerten nach Tabelle A 4-1 aus /KTA 14/ wird der Scharparameter nach Gl. A4-3 aus /KTA 14/  $\sigma_W = 1,07 \text{ E-4 s}^{-1}$ .

Für den Fall der planmäßigen Ventilation ist die Temperatur nach ETK mit  $RT = 20 \text{ °C}$  zum Zeitpunkt  $t_{\dot{a},p,oh\text{-Wärmesenke}}$  (Gl. A 4-5)  $T_{g,p} = 913,2 \text{ °C}$ , sodass die kalorische Mitteltemperatur in der Wand  $T_{SW,p} = 243,6 \text{ °C}$  wird und der Energieverlust in die Trennwand (Gl. A 4-1 und A 4-2)  $\Delta Q_W = 216,3 \text{ kWh}$  beträgt.

Für den Fall der unplanmäßigen Ventilation ist die Temperatur nach ETK (Gl. A 4-5)  $T_{g,u} = 1001,7 \text{ °C}$ , sodass die kalorische Mitteltemperatur  $T_{SW,u} = 430 \text{ °C}$  wird und der Energieverlust in die Trennwand (Gl. A 4-1 und A 4-2)  $\Delta Q_W = 396,4 \text{ kWh}$  beträgt.

Die neue rechnerische Brandbelastung unter Berücksichtigung der Wärmesenke beträgt für die beiden Betrachtungsfälle  $q_{R,p} = 68,8 \text{ kWh/m}^2$  bzw.  $q_{R,u} = 67,6 \text{ kWh/m}^2$  (der Unterschied ist unerheblich, zur Verdeutlichung werden aber beide Fälle unterschieden).

### Äquivalente Branddauer

Die äquivalente Branddauer im Öllageraum einschließlich Berücksichtigung der Wärmesenke wird für die vier Betrachtungsfälle (2 x Ventilation, Index: p/u, 2 x Brandlastverteilung, Index: gleich/pkt) entsprechend

- für die planmäßigen Fälle (Index: p)

$$t_{\text{ä,p,gleich}} = t_{\text{ä,0,p, gleich}} * f_H * f_{A_{V,p}} = 64 \text{ min} * 0,95 * 0,515 = 31,3 \text{ min} \quad \text{bzw.}$$

$$t_{\text{ä,p,pkt}} = t_{\text{ä,0,p, pkt}} * f_H * f_{A_{V,p}} = 98 \text{ min} * 0,95 * 0,515 = 47,9 \text{ min} \quad \text{und}$$

- für die unplanmäßigen Fälle (Index: u)

$$t_{\text{ä,u,gleich}} = t_{\text{ä,0,u, gleich}} * f_H * f_{A_{V,u}} = 63 \text{ min} * 0,95 * 0,93 = 55,7 \text{ min} \quad \text{bzw.}$$

$$t_{\text{ä,u,pkt}} = t_{\text{ä,0,u, pkt}} * f_H * f_{A_{V,u}} = 97 \text{ min} * 0,95 * 0,93 = 85,7 \text{ min}$$

### Sicherheitskonzept

Innerhalb des Sicherheitskonzepts sind die Rohrabschottungen als Bauteile, die einen Brandbekämpfungsabschnitt trennen, in die Klasse SKb 2 einzustufen (s. auch /HOS 96/, S. 60/). Die Brandbekämpfung entspricht der Kategorie C, sodass der Sicherheitsbeiwert für die beiden Betrachtungsfälle  $\gamma_p = 1,0$  bzw.  $\gamma_u = 0,5$  beträgt.

### Ergebnisse

Die erforderliche Feuerwiderstandsdauer für die Abschottung oberhalb der Auffangwanne (Punktbrandlast) beträgt dann

$$\text{erf } t_f = \text{Max} (t_{\text{ä,p,pkt}} * \gamma_p, t_{\text{ä,u,pkt}} * \gamma_u) = \text{Max} (47,9 \text{ min}, 42,8 \text{ min}) = 48 \text{ min}$$

In diesem Fall ist die planmäßige Ventilation bemessungsrelevant. Entsprechend ist die Abschottung hochfeuerbeständig (R60) auszuführen.

Die erforderliche Feuerwiderstandsdauer für die Abschottung in der gegenüberliegenden (liegt der Brandlast gegenüber, deshalb „gleichmäßig verteilt“ anzusetzen) Wand beträgt dann

$$\text{erf } t_f = \text{Max} (t_{\text{ä,p,gleich}} * \gamma_p, t_{\text{ä,u,gleich}} * \gamma_u) = \text{Max} (31,3 \text{ min}, 27,8 \text{ min}) = 31 \text{ min}$$

In diesem Fall ist die planmäßige Ventilation bemessungsrelevant. Entsprechend ist die Abschottung hochfeuerbeständig (R60) auszuführen.

# | Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Kontakt:**

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: [www.bfs.de](http://www.bfs.de)

E-Mail: [ePost@bfs.de](mailto:ePost@bfs.de)

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz